



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ OCELÍ PRO OZUBENÁ KOLA

HEAT TREATMENT OF GEAR STEELS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Matěj Šnevajs

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Vít Jan, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav materiálových věd a inženýrství
Student: **Matěj Šnevajs**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Vít Jan, Ph.D.**
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Tepelné zpracování ocelí pro ozubená kola

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je teoretické zpracování používaných postupů tepelného zpracování ozubených kol pro převodovky a dále experimentální analýza tepelně zpracovaného materiálu ozubeného kola.

Cíle bakalářské práce:

Teoretická studie mechanismů uplatňujících se u tepelného zpracování ocelí pro ozubená kola. Experimentální analýza dvou materiálů a kol vyrobených z nich.

Seznam doporučené literatury:

Fremunt, P. a Podrábský, T. Konstrukční oceli. Brno: Cerm, 1996. 267 s.

Pluhař, J., Puškár, A., Koutský, J., Macek, K. a Beneš, V. Fyzikální metalurgie a mezní stavy materiálu. Praha: SNTL, 1987. 298 s.

Šenberger, J. aj. Metalurgie oceli na odlitky. Brno: Vysoké učení technické v Brně - Nakladatelství VUTUM, 2008. 310 s. ISBN 978-80-214-3632-9.

Ptáček, L. a kol. Nauka o materiálu II. 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2002. 384 s. ISBN 80-7204-248-3.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá vhodnými druhy tepelného a tepelně-chemického zpracování cementačních ocelí pro výrobu ozubených kol. Experimentální část je zaměřena na zkoumání dvou konkrétních ozubených kol, vyrobených z ocelí 14 224 a ZF1A, dodané společností TATRA TRUCKS a.s. Výsledky prezentují jejich prokalitelnost, tvrdost, mikrostrukturu a mikrotvrdost cementační vrstvy.

Klíčová slova

ocel 14 224, ocel ZF1A, kalení, Jominiho zkouška, mikrotvrdost

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with suitable types of heat and heat-chemical treating of case hardening steel for production of gear wheels. The experimental part focuses on examination of two specific gear wheels made of 14 224 and ZF1A steel, which were donated by the company TATRA TRUCKS a.s. This bachelor thesis presents results of their hardenability, microstructure, hardness and microhardness of the case hardening layer.

Key words

steel 14 224, steel ZF1A, hardening, Jominiho test fixture, microhardness

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠNEVAJS, M. *Tepelné zpracování ocelí pro ozubená kola*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 42 s., 1 příloha. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Vít Jan, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Tepelné zpracování ocelí pro ozubená kola** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Matěj Šnevajs

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Vítu Janovi, PhD. za vedení, konzultace a cenné připomínky.

Děkuji také vedení společnosti TATRA TRUCKS a.s. za dodaný experimentální materiál.

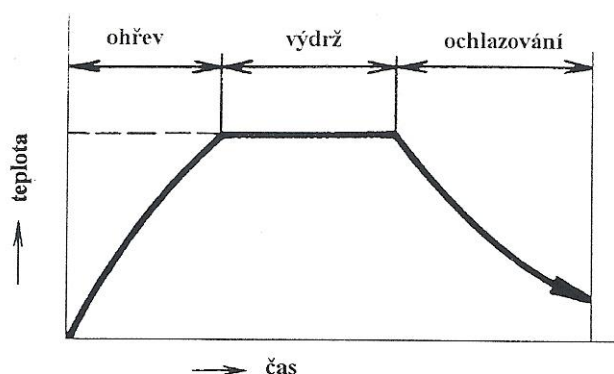
OBSAH

1	ÚVOD.....	8
1.1	Cíl práce.....	8
2	VÝROBA OZUBENÝCH KOL	9
2.1	Dokončovací operace	9
3	TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ	10
3.1	Žíhání.....	10
3.1.1	Žíhání bez překrystalizace.....	10
3.1.2	Žíhání s překrystalizací.....	11
3.1.3	Kombinované žíhání.....	11
3.2	Kalení.....	12
3.2.1	Kalicí teplota.....	13
3.2.2	Kalicí prostředí.....	13
3.2.3	Způsoby kalení	15
3.2.4	Povrchové kalení	16
3.3	Popouštění.....	17
4	CHEMICKO-TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ.....	17
4.1	Cementování.....	17
4.1.1	Tepelné zpracování po cementaci.....	19
4.2	Nitridování.....	20
5	OCELI K CEMENTOVÁNÍ.....	21
5.1	Vliv legujících prvků na vlastnosti oceli	21
6	EXPERIMENTÁLNÍ MATERIÁL A METODIKA.....	27
6.1	Jominiho zkouška prokalitelnosti.....	30
6.2	Příprava metalografických vzorků	30
6.3	Měření mikrotvrdosti.....	31
7	VÝSLEDKY	32
7.1	Prokalitelnost	32
7.2	Mikrostruktury	34
7.3	Profil mikrotvrdosti.....	36
8	DISKUZE	38
9	ZÁVĚR.....	40
10	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	41
11	SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK	41
12	PŘÍLOHY	42

1 ÚVOD

Mechanismy s ozubenými koly jsou využívány u mnoha strojů, základním prvkem je jednoduchý převod ozubeného soukolí. Principem je zajištění transformace pohybu mezi vstupním a výstupním členem. Výhodou těchto mechanismů je vysoká účinnost, životnost a spolehlivost, možnost přenosu vysokého krouticího momentu a stálý převodový poměr. Ozubená kola lze vyrábět z různých materiálů. Nejčastěji jsou ozubená kola vyrobená z oceli, tímto materiálem se také ve své práci zabývám.

Na ocelová ozubená kola jsou kladeny vysoké konstrukční požadavky. U ozubených kol je namáhání cyklické a jsou namáhané především zuby. Požadovaných vlastností kladených na ozubená kola lze dosáhnout legováním ocelí společně s tepelným zpracováním. Princip tepelného zpracování spočívá v ohřevu oceli na určitou teplotu, setrvání na této teplotě a následné ochlazení, během tohoto procesu se mění mechanické a technologické vlastnosti a někdy také chemické složení oceli. Tento postup lze několikrát opakovat. [7]



Obr. 1.1: Princip tepelného zpracování [1]

1.1 Cíl práce

Cílem práce je popsat tepelná a tepelně-chemická zpracování využívajících se při výrobě ozubených kol. Dalším cílem bylo ze dvou dodaných ozubených kol připravit metalografické vzorky, na kterých byla pozorována mikrostruktura a provedeno měření mikrotvrdomosti u kraje zubu. Na vzorcích ze stejných materiálů jako ozubená kola byla provedena Jominiho zkouška prokalitelnosti. Tato práce je zaměřena na dvě určité oceli a to ocel 14 224 a ocel ZF1A s cílem porovnání důležitých mechanických a materiálově-technologických vlastností.

2 VÝROBA OZUBENÝCH KOL

Operace provedené při výrobě ozubených kol mají zásadní dopad na vlastnosti materiálu.

Ozubená kola lze vyrobit různými způsoby. Mezi nejčastější metody patří odlévání, slinování, tváření, obrábění.

Ozubená kola můžeme odlévat do písku, skořepinových nebo trvalých forem, odstředivým litím nebo do forem vytvořených metodou vytavitelných modelů.

Slinování ozubených kol probíhá práškovou metalurgií.

Tvářet ozubená kola lze za tepla i za studena. Jedna z nejnovějších a nejproduktivnějších metod výroby ozubených kol je válcování za studena. Tímto způsobem se dosáhne kvalitního ozubení s hladkým povrchem a také se výrazně zlepši mechanické vlastnosti materiálu.

Většina ozubených kol se vyrábí obráběním, a to dvěma způsoby, dělicím a odvalovacím.

U dělicího způsobu obrábění je shodný profil nástroje s tvarem zubové mezery. Zuby se vytvářejí jeden za druhým pomocí dělicího přístroje, kterým zpravidla bývá kotoučová modulová fréza.

U odvalovacího způsobu obrábění vznikají zubové mezery ozubeného kola plynulým odvalováním nástroje. Přičemž profil zubové mezery není shodný s profilem nástroje, kterým je zpravidla kotoučový nebo hřebenový obrážecí nůž nebo odvalovací fréza. [2] [6]

2.1 Dokončovací operace

Jakékoli výrobní nepřesnosti tvaru zubů mají za následek přidavné dynamické zatížení, zvláště při přenášení velkých točivých momentů nebo při vysokých obvodových rychlostech. Toto zatížení lze snížit zlepšením jakosti povrchu pomocí dokončovacích operací.

Chemicko-tepelně neupravená ozubená kola vyrobená obráběním se dokončují ševingováním nebo leštěním.

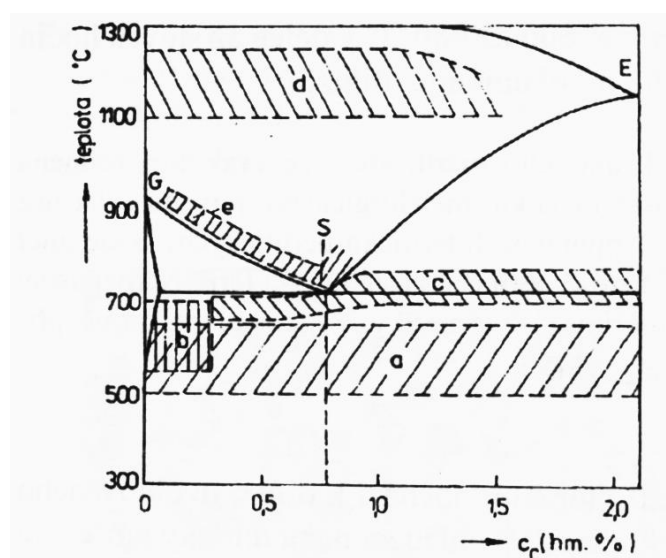
Kalená nebo cementovaná a kalená ozubená kola se dokončují broušením nebo lapováním. [2]

3 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ

Tepelné zpracování je řízené využívání fázových a strukturních přeměn v tuhém stavu. Pomocí tepelného zpracování se výrazně ovlivňují mechanické a technologické vlastnosti a v případě chemicko-tepelného zpracování také chemické složení. [3]

3.1 Žíhání

Jedná se o způsob tepelného zpracování, jehož cílem je vytvoření homogenní jemnozrné struktury s vhodnou tvárností, houževnatostí a obrobitelností. Rychlost ochlazování je malá, zpravidla se jedná o chladnutí na vzduchu nebo v peci. Může se jednat jak o přípravnou operaci, tak konečnou operaci, která má konečný vliv na vlastnosti materiálu. Při výrobě ozubených kol se používá žíhání na měkko a normalizace. Různým typům žíhání odpovídají určité žíhací teploty, které jsou schematicky zaznačeny na obr 3.1. [3]



Žíhání:
a - ke snížení pnutí,
b - rekrytalizační,
c - na měkko,
d - homogenizační,
e - normalizační

Obr. 3.1: Oblasti žíhacích teplot v diagramu Fe-Fe₃C [3]

3.1.1 Žíhání bez překrystalizace

U polymorfních ocelí žíhací teploty nepřesáhnou teplotu A_1 . Nepolymorfní oceli mají pouze jeden typ mřížky, takže se vždy jedná o žíhání bez překrystalizace. Při velmi vysokých žíhacích teplotách dochází k rozpuštění karbidů a jiných vytvrzujících částí ve feritu nebo austenitu. Mezi žíhání bez překrystalizace patří žíhání ke snížení pnutí, rekrytalizační žíhání, rozpouštěcí žíhání a žíhání na měkko.

Žíhání na měkko je prováděno za účelem zlepšení obrobitelnosti, proto dochází také ke snížení tvrdosti oceli. Toho je dosaženo sferoidizací perlitického, popř. sekundárního cementitu při teplotách okolo A_1 . Podeutektoidní oceli se žíhají na měkko při teplotách pod A_1 , tj. 600 až 720 °C. Chladnutí probíhá v peci po dobu alespoň 4 hodin. Lamelární perlit se mění na zrnitý perlit. Pro nadeutektoidní oceli přesahují žíhací teploty teplotu A_1 , při těchto teplotách dochází k sferoidizaci sekundárních, popř. ledeburických karbidů. Následuje velmi pomalé chladnutí v peci, při kterém vzniká zrnitý eutektoid. [3]

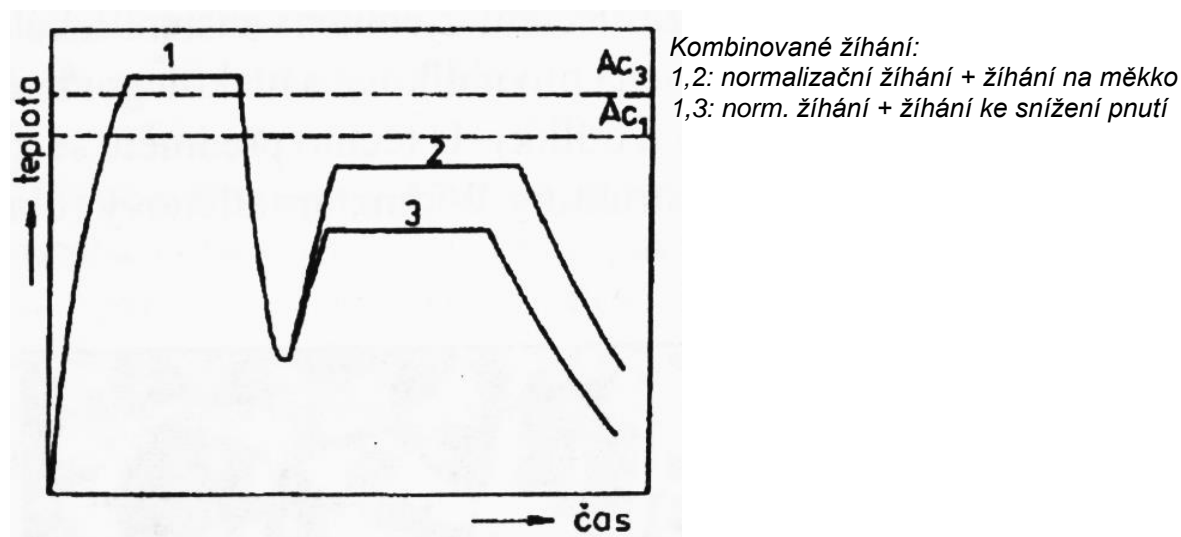
3.1.2 Žihání s překrystalizací

Při žihání s překrystalizací se výchozí feriticko-cementická struktura úplně nebo téměř úplně přemění v austenit. U podeutektoidních ocelí žihací teploty přesahují teplotu A_3 . Nadeutektoidní oceli se žihají v teplotách nad A_m nebo v intervalu od teploty A_1 do A_m . Žihání s překrystalizací dělíme na homogenizační žihání, izotermické žihání a normalizační žihání.

Cílem normalizačního žihání neboli normalizace, je zjemnění austenitického zrna a dosažení rovnoměrné sekundární struktury. Provádí se zpravidla na výkvcích, svařencích a odlitcích, ke zjemnění hrubé struktury. Pro normalizaci jsou vhodné uhlíkové a nízkolegované oceli. Podeutektoidní oceli se ohřívají 30 až 50 °C nad A_3 a chladnou na vzduchu nebo pozvolně v peci, čímž se také sníží vnitřní pnutí. Volba rychlosti ochlazování v oblasti perlitické přeměny má vliv na konečnou strukturu. Při malém přechlazení je výsledná struktura hrubší, tvárnější a měkčí, naopak při větším přechlazení lze dostat strukturu jemnější, pevnější a tvrdší. Pro nadeutektoidní oceli není normalizační žihání časté. Ojediněle se používá k potlačení vzniku síťoví sekundárního cementitu, čehož se dosáhne ohřevem mezi teploty A_1 až A_m a ochlazením na proud vzduchu. [3]

3.1.3 Kombinované žihání

Často se používá u vysokouhlíkových a legovaných ocelí místo žihání s chladnutím v peci. Skládá se z normalizačního žihání s následuje žihání na měkko nebo žihání ke snížení pnutí. [3]



Obr. 3.2: Kombinované žihání [3]

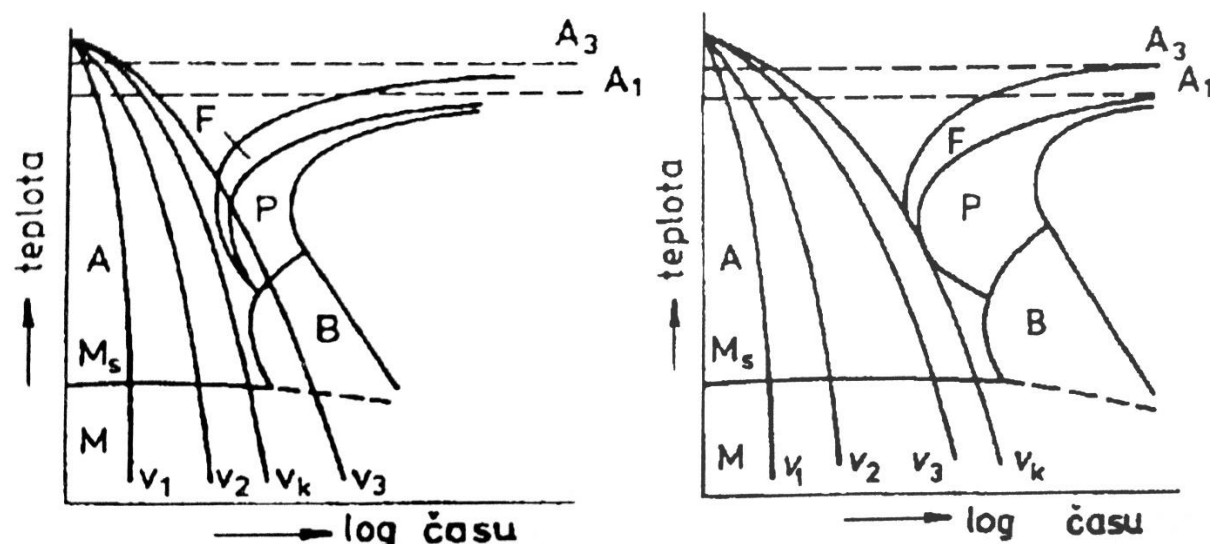
3.2 Kalení

Cílem tohoto tepelného zpracování je dosažení nerovnovážného stavu v oceli. Kalení se dělí na martenzitické a bainitické v závislosti na převažující strukturní složce, zpravidla je snaha o dosažení martenzitické struktury.

Schopnost oceli získat martenzitickou strukturu nazýváme kalitelnost a tyhle oceli nazýváme kalitelné.

Tvrdost oceli po zakalení charakterizuje zakalitelnost. Tvrdost martenzitu závisí na obsahu uhlíku v austenitu a na stavu austenitu před kalením (homogenita, velikost zrna, přítomnost karbidů).

Prokalitelnost je schopnost oceli získat v určité hloubce pod povrchem takovou tvrdost, která odpovídá zakalitelnosti. Rychlost ochlazování směrem od povrchu klesá a v případě, že klesne pod kritickou rychlost ochlazování v_k nebude materiál v jádře zakalen. Legovaná ocel má v porovnání s uhlíkovou ocelí menší hodnotu v_k , proto se zakalí do větší hloubky. Prokalitelnost je významná materiálově-technologická charakteristika, hodnota se určuje například Jominiho zkouškou prokalitelnosti. [3]

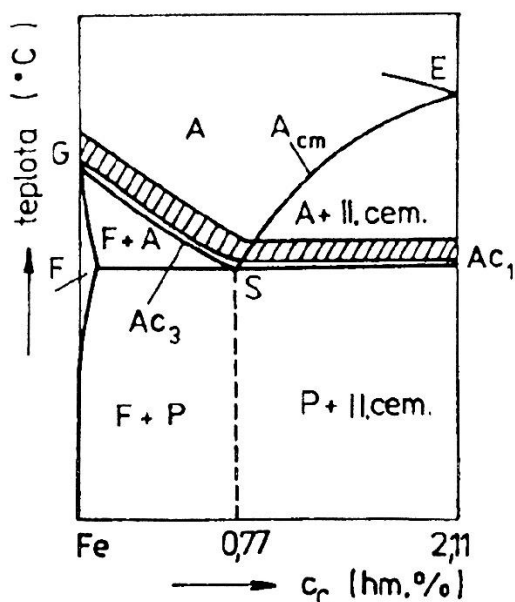


Obr. 3.3: Průběh ochlazování při kalení v diagramu ARA [3] Vlevo: legovaná ocel
Vpravo: uhlíková ocel

3.2.1 Kalicí teplota

V případě podeutektoidních ocelí se kalicí teplota pohybuje v rozmezí 30 až 50 °C nad teplotou A_{c3} . Při této teplotě je dosaženo homogenní austenitické struktury v co nejkratším čase a je zachováno jemné austenitické zrna.

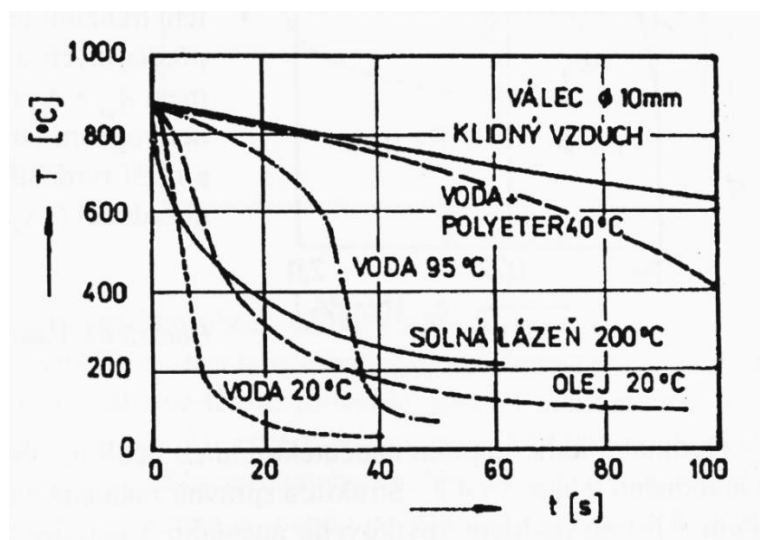
Nadeutektoidní oceli bývají kaleny z teplot 30 až 50 °C nad A_{c1} . Správně zakalená ocel je tvořena martenzitickou strukturou s podílem zbytkového austenitu a nerozpuštěného sekundárního cementitu. Před samotným kalením se zařazuje žíhání na měkko, které má za následek rovnoměrně rozložený sekundární cementit a zaručuje optimální konečné vlastnosti. Pokud by kalicí teplota byla nad A_{cm} sekundární cementit by se rozpustil, zhrublo by austenitické zrna, zvýšili by se koncentrace uhlíku v austenitu a následně i v martenzitu, zvýšilo by se strukturní pnutí a výskyt mikrotrhlin, což je samozřejmě považováno za nežádoucí. [3]



Obr. 3.4: Pásmo kalicích teplot v diagramu $Fe-Fe_3C$ [3]

3.2.2 Kalicí prostředí

Za optimálním kalicí prostředím je považováno takové, které umožňuje chlazení jen málo překračující kritickou rychlost. Příliš vysoká ochlazovací rychlost má za následek vysoká teplotní a strukturní pnutí. Vysoká účinnost ochlazování je požadována v oblasti perlitické přeměny (650 až 550 °C), nižší v oblasti martenzitické přeměny (350 až 250 °C), ale ne příliš malá na to, aby došlo ke stabilizaci zbytkového austenitu. Hlavní charakteristikou kalicích prostředí je jejich intenzita ochlazování. Účinnost ochlazování závisí na mnoha faktorech: nejdůležitějšími jsou tepelná vodivost, měrné a výparné teplo, viskozita prostředí a povrch kaleného předmětu a jeho čistota. [3]



Obr. 3.5: Ochlazovací křivky ve středu ocelového válce $\varnothing 10 \text{ mm}$ [3]

Voda je velmi levné a účinné kalicí prostředí, největší účinnost má v oblasti nosu ARA diagramu, proto lze kalit i předměty z uhlíkových ocelí. V oblasti martenzitické přeměny je však příliš velká ochlazovací účinnost nežádoucí, protože dochází ke zvyšování vnitřních pnutí. Růst teploty vody není žádoucí, protože s narůstající teplotou vody výrazně klesá její chladicí účinnost v perlitické oblasti, ale jen málo v oblasti martenzitické přeměny. Chladicí účinnost lze zvýšit pohybem kalené součásti nebo různými přísadami (kyseliny, soli, louhy, rozpustné polymery).

Dalším kalicím prostředím jsou oleje, ty mají asi 3x až 4x nižší ochlazovací rychlost v perlitické oblasti a asi 10x nižší v martenzitické oblasti v porovnání s vodou. Ochlazovací účinnost není příliš závislá na teplotě. Vlivem nižší ochlazovací rychlosti v oblasti martenzitické přeměn nedochází ke vzniku vnitřních pnutí, a tak se do olejů kalí především legované oceli. Oleje jsou dražší, hrozí zde nebezpečí vznícení a jejich časté používání má negativní vliv na životní prostředí.

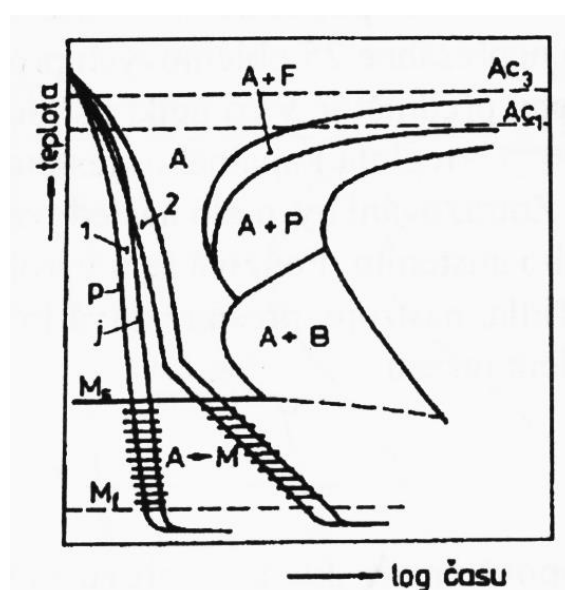
Nejméně účinným kalicím prostředím je vzduch, ochlazování je tedy pomalé a plynulé. Účinnost lze zvýšit prouděním nebo kombinací s vodou (tzv. vodní mlha). Vzduch jako kalicího prostředí využíváme v případě vysokolegovaných tzv. samokalitelných ocelí. Kalicím prostředím mohou být také teplé lázně z tavenin kovů, olejů nebo solí. Dosahují poměrně nízké chladicí účinnosti, která klesá s teplotou. [3]

3.2.3 Způsoby kalení

Zvolený způsob kalení závisí na druhu oceli, požadovaných vlastnostech, velikosti a členitosti předmětu.

Nejjednodušším a nejčastějším způsobem je martenzitické kalení do studené lázně. Ochlazovacím prostředím je voda, olej nebo vzduch. Výhodou je nízká cena a technologická nenáročnost, ale při kalení do vody hrozí vysoká úroveň vnitřních pnutí, které mohou vést až k praskání kalených předmětů.

Dalším častým způsobem je přerušované (lomené) kalení. Kalený předmět je zprvu intenzivně ochlazován, tak aby bylo zabráněno perlitické přeměně a těsně nad teplotou M_s je předmět přemístěn do mírnějšího kalicího prostředí, kde probíhá martenzitická přeměna. Pomalejší druhé ochlazování vede ke snížení strukturních pnutí, využívá se u rozměrných a tvarově složitých předmětů. [3]



Způsob kalení:

1: kalení do studené lázně

2: lomené kalení

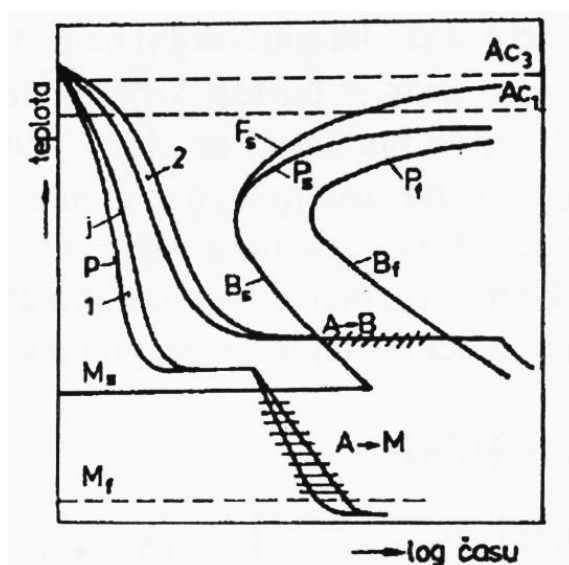
p: kalení na povrch součásti

j: kalení na jádro součásti

Obr. 3.6: Průběh kalení do studené lázně a lomeného kalení [3]

Při termálním kalení probíhá ochlazování v lázni o teplotě těsně nad M_s . Díky prodlevě na této teplotě se vyrovnají teploty povrchu a jádra kaleného předmětu, čímž se potlačí vznik teplotních pnutí. Prodleva však nesmí být příliš dlouhá, aby nedošlo ke vzniku bainitu. Po vyjmutí předmětu z lázně probíhá, zpravidla na vzduchu, martenzitická přeměna. Termální kalení je vhodné pro legované oceli, nebo pro malé, tenkostěnné a tvarově složité předměty z uhlíkových nebo nízkolegovaných ocelí.

Izotermické zušlechťování probíhá ochlazování v termální lázni roztavených solí nebo slitin kovů o teplotě bainitické přeměny (300 až 400 °C). Ochlazování na vzduchu probíhá až po ukončení bainitické přeměny. Je dosaženo minimálních teplotních i strukturních pnutí, proto nehrozí popraskání kaleného předmětu. Tento způsob je vhodný pro menší předměty z nízkolegované oceli a předměty do průřezu pouze 5 mm z uhlíkových ocelí. Nepoužívá se pro vysokolegované oceli z důvodu potřeby dlouhé prodlevy pro ukončení bainitické přeměny. Izotermicky zušlechtěné oceli se zpravidla dále nepouští. [3]



Způsob kalení:

1: termální kalení

2: izotermické zušlechťování

p: kalení na povrch součásti

j: kalení na jádro součásti

Obr. 3.7: Průběh termálního kalení a izotermického zušlechťování [3]

3.2.4 Povrchové kalení

Jedná se o zpevnění povrchu fázovou transformací. Cílem je dosažení vysoké tvrdosti povrchu a houževnatého jádra. V případě ozubených kol se jedná o častou operaci. Povrchová vrstva se nejdříve velmi rychle zahřeje – austenitizuje, poté se zakalí. Rychlost ohřevu bývá až několik stovek °C za sekundu z důvodu, aby se zahřál pouze povrch. Ohřev probíhá plamenem, indukovanými proudy, laserem nebo elektronovým svazkem. Pro ozubená kola se nejčastěji používá povrchové kalení plamenem. Aby bylo dosaženo vyhovující chemické homogenity austenitu je potřeba kalicích teplot asi o 200 °C vyšších než u objemového kalení. S rostoucí intenzitou ohřevu dochází také ke zjemnění austenitického zrna a následně i zjemnění výsledné martenzitické struktury. K ochlazování se v případě uhlíkových ocelí používá voda, v případě nízkolegovaných ocelí olej a v případě ohřevu pomocí laseru nebo elektronového svazku vzduch. Vlivem velkého teplotního gradientu a nehomogenní struktury vznikají značná vnitřní pnutí, které jsou snižována následným popouštěním. Zakalená struktura je martenzitická, zatímco zbytek součásti, kde nedošlo k překristalizaci má výchozí strukturu. Povrchově se kalí výrobky z podeutektoidní uhlíkové nebo nízkolegované oceli s obsahem uhlíku nad 0.35 hm. %. Povrchovému kalení předchází normalizace, v případě součástek, na které je kladen vyšší požadavek na pevnost a také houževnatost jádra předchází zušlechťování. [3]

Modul ozubení	Tloušťka zakalené vrstvy [mm]	
	bok zubu	pata zubu
6	1,4 – 1,7	0,8 – 1,0
8	1,6 – 1,9	1,0 – 1,2
10	1,8 – 2,1	1,0 – 1,2
12	2,0 – 2,4	1,2 – 1,4
16	2,0 – 2,4	1,2 – 1,4

Tab. 3.1: Doporučená tloušťka zakalené vrstvy u ozubených kol [4]

3.3 Popouštění

Jedná se o ohřev na teplotu menší než A_1 , výdrž na teplotě zpravidla okolo 2 hodin a následného ochlazování o vhodné intenzitě. Cílem je snížit povrchová pnutí vzniklé kalením, proto se ocel popouští hned po kalení. Popouštěcí teplota má zásadní vliv na rozsah strukturních změn a z toho vyplívajících změn mechanických vlastností.

Popouštění při nízkých teplotách – napouštění se děje mezi teplotami 100 až 300 °C, v případě vysocelegovaných nástrojových ocelí až 600 °C. Popouštění probíhá ve vařící vodě, v olejových nebo solných lázních, nebo v elektrických pecích. Cílem je snížení vnitřních pnutí, zmenšení podílu zbytkového austenitu, stabilizace rozměru při zachování vysoké tvrdosti. Zpravidla se používá pro nástrojové oceli, méně často pro součásti po cementaci a povrchovém kalení, některé vysocepevné oceli a jiné konstrukční oceli.

Při popouštění při vysokých teplotách (anizotermické zušlechťování) bývají teploty v rozmezí 400 až 650 °C. Cílem je dosažení optimálního stavu mezi pevnostními vlastnostmi, houževnatostí a plasticitou. Tohoto stavu lze dosáhnout pomocí sorbitické struktury.

V některých intervalech popouštěcích teplot nedochází k nárůstu houževnatosti během poklesu pevnostních charakteristik, tento jev se nazývá popouštěcí křehkost. [3]

4 CHEMICKO-TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ

Jedná se o způsob difuzního sycení povrchu oceli různými prvky, nejčastěji C, N, B, Si, Al. Cílem tohoto zpracování je dosažení rozdílných mechanických nebo fyzikálně chemických vlastností na povrchu a v jádře, nejčastěji se jedná o zvýšení tvrdosti a odolnosti proti opotřebení povrchu při zachování houževnatosti jádra. Obohacení povrchu příslušným prvkem probíhá za zvýšených teplot, následuje pomalé ochlazení nebo tepelné zpracování, obvykle kalení s nízkoteplotním popouštěním. Sycení probíhá v plynném, kapalném nebo tuhém prostředí za dostatečné teploty a jeho intenzita je závislá na druhu oceli, chemickém složení prostředí, druhu prvku, teplotě a dalších faktorech. Použité prostředí uvolňuje rozkladem molekul sloučeniny požadovaný prvek v atomárním stavu, ten je adsorbován povrchem oceli a pohybuje se mřížkou železa ve směru od povrchu pomocí difuze. Ozubená kola se nejčastěji cementují, případně nitridují. [3]

4.1 Cementování

Cementování je způsob chemicko-tepelného zpracování, kdy je povrch oceli sycen uhlíkem na eutektoidní, případně těsně nadeutektoidní koncentraci, to je 0,8 až 1 hm %. Sycení probíhá při teplotě nad A_{c3} , struktura je austenitická, což zajišťuje výrazně vyšší rozpustnost uhlíku než ve feritu. V praxi se využívají cementační teploty v intervalu 850 až 950 °C, nižších teplot se využívá pro cementaci součástí velmi malých průřezů, naopak vyšší teploty se volí v případě jemnozrné struktury cementačních ocelí. Při cementaci součástí s následným kalením a nízkoteplotním popouštěním se dosahuje vysoké tvrdosti povrchu (až 800 HV), při zachování houževnatosti jádra. K cementování se používají oceli s obsahem uhlíku v rozmezí 0,10 až 0,25 hm. %. Cementace se používá na ozubená kola, řetězová

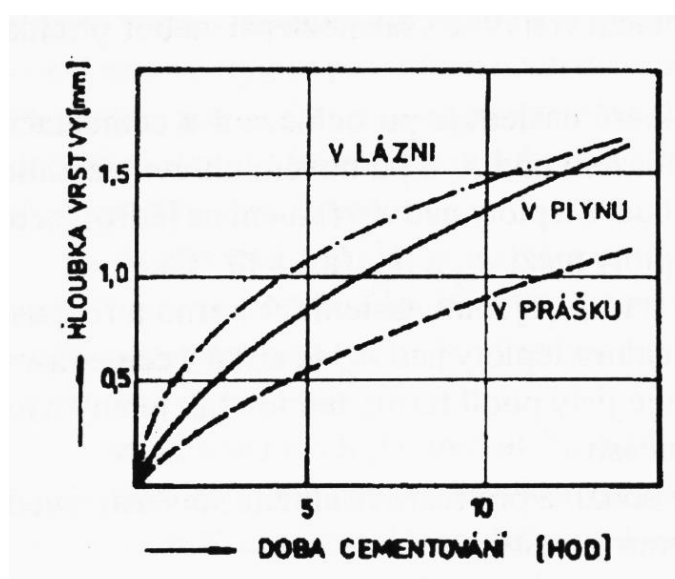
kola, drážkované hřídele, čepy a další součásti, kde je kladen nárok na vysokou tvrdost povrchu.

Cementování součástí v sybkém prostředí spočívá v zasypání předmětu v uzavřeném prostoru práškovou směsí dřevěného uhlí s obsahem uhlíčitánu barnatého, popřípadě NaCO_3 nebo CaCO_3 , který funguje jako aktivátor procesu, protože na cementační teplotě dochází k jeho rozkladu. Na cementační teplotě probíhá reakce mezi dřevěným uhlím a kyslíkem a vzniká oxid uhelnatý CO , který se při kontaktu se žhavým povrchem součástí rozkládá na oxid uhličitý a uhlík $2\text{CO} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{C}$. Atomární uhlík je adsorbován na povrchu součásti a pomocí difuzního mechanismu prostupuje mřížkou do součásti. CO_2 reaguje s uhlíkem obsaženým ve dřevěném uhlí a vzniká CO , jeho rozkladem se vznikají další elementární atomy uhlíku. Pokud se ve směsi zvýší obsah CO_2 na úkor CO , dochází k oduhličování. Cementační atmosféra je v tomto případě velmi obtížně kontrolovatelná, proto nedochází k rovnoměrnému nauhličení. Proces je zdoluhavý a ohřev energeticky náročný. Mezi výhody patří nízké pořizovací náklady. Dnes se cementace v prášku zřídka provádí v kusové výrobě.

Při cementování v plynném prostředí se používá směs plynů CO , CO_2 , CH_4 , H_2 a vody. Mezi výhody patří lepší nauhličovací schopnosti v porovnání se sybkým prostředím a jednoduchá možnost regulace cementační atmosféry. Nauhličování probíhá v případě malosériové výroby v šachtových elektrických pecích, kde se přímo získává účinná atmosféra krakováním uhlovodíků a probíhá nucená cirkulace. V případě velkosériové výroby probíhá nauhličování v průběžných pecích, kam se atmosféra přivádí z generátoru a které umožňují spojení s následným kalením a popouštěním.

K cementaci v kapalném prostředí se používají lázně roztavených chloridových solí s přísadami, které zajišťují zdroj uhlíku (např. Na_2CO_3 , SiC). Intenzita nauhličování je největší, přesto není tato metoda příliš rozšířena.

Nauhličená vrstva je tvořena nadeutektoidním pásmem (perlit, sekundární cementit), eutektoidním pásmem a podeutektoidním pásmem (perlit, ferit), přičemž za cementační vrstvu se považuje pásmo nadeutektoidní, eutektoidní a polovina podeutektoidního. Z tohoto hlediska se cementační vrstvy dělí na tenké (méně než 0,5 mm), střední (0,5 až 1,5 mm) a tlusté (nad 1,5 mm). [3]



Obr. 4.1: Hloubka cementační vrstvy v závislosti na době cementace [3]

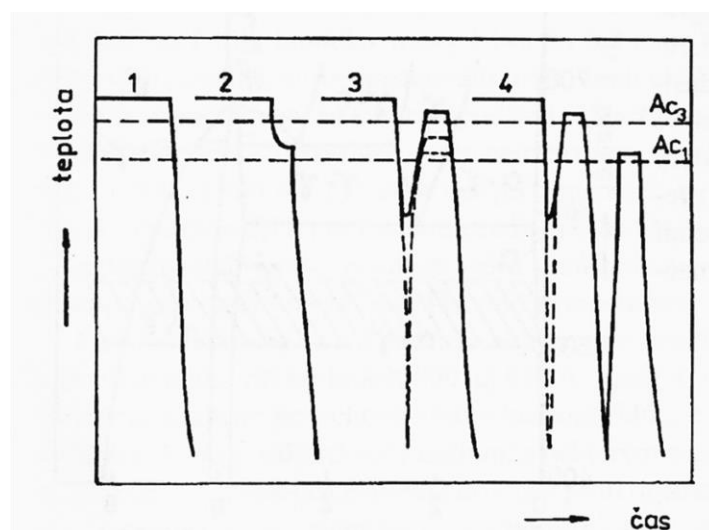
4.1.1 Tepelné zpracování po cementaci

Po cementaci následuje kalení a nízkoteplotní popouštění. Způsob kalení závisí na způsobu nauhličování, typu cementační oceli a na požadavcích kladených na součástku z hlediska provozního namáhání.

U přímého kalení z cementační teploty se kalí do vody, legované oceli do oleje a lze jej použít v případě cementování v plynném nebo kapalném prostředí. Z důvodu dlouhé výdrže na cementační teplotě dochází ke zhrubnutí austenitických zrn, a to má při přímém kalení za následek hrubou martenzitickou strukturu na povrchu i v jádře součásti. Dochází také k vysoké úrovni vnitřních pnutí a deformaci.

Kalení s přichlazením spočívá v ochlazení součásti z cementační teploty těsně nad teplotu A_{c1} (asi 750 až 780 °C) a následného se kalení. Sníží se vnitřní pnutí a deformace, nedochází však ke zjemnění austenitických zrn, proto je struktura cementační vrstvy stejná jako u přímého kalení.

Nejčastěji se běžné cementační oceli ochladí z cementační teploty na asi 600 °C. Při ochlazení pod A_1 dojde k překrystalizaci a následným zahřátí na kalicí teplotu se zjemní austenitická zrna. Při kalicí teplotě nad A_{c3} se součást kalí na jádro, při teplotě těsně nad A_{c1} na povrch. Případně se volí teplota mezi A_{c1} a A_{c3} (asi 840 °C). Dvojité kalení se nejprve kalí z teploty nad A_{c3} , kterým se zjemní austenitické zrno a rozpustí sekundární cementit v povrchové vrstvě. Následuje druhé kalení z teploty nad A_{c1} , kterým se získá jemná martenzitická struktura v cementované vrstvě. Jádro bude obsahovat jistý podíl jemného feritu, který však zásadně nesnižuje houževnatost jádra. [3]



Způsob kalení:

- 1: přímé z cementační teploty
- 2: kalení s přichlazením
- 3: po normalizačním žhání
- 4: dvojité kalení

Obr. 4.2: Způsoby kalení po cementování [3]

Závěrečnou operací je nízkoteplotní popouštění. Teploty se pohybují v rozmezí 150 až 200 °C a výdrž na teplotě mezi 1 a 2 hodinami. Cílem je snížení vnitřních pnutí a stabilizace struktury. [3]

4.2 Nitridování

Nitridací je označováno sycení povrchu součásti dusíkem s cílem dosažení vysoké povrchové tvrdosti. Nitridace probíhá při teplotách 500 až 550 °C po dobu až 60 hodin. Povrch je sycen až do 12 hm. % dusíku a tloušťka nitridované vrstvy bývá do 0,1 mm. Dosažená tvrdost povrchu je 1 000 až 1 200 HV. Během sycení povrchu dusíkem dochází nejčastěji ke vzniku nitridů a karbonitridů nebo jiných velmi tvrdých intersticiálních sloučenin dusíku se železem a s některými přísadovými kovy. Při nitridaci ocelí, které jsou legovány nitridotvornými prvky se tvoří speciální nitridy (např. CrN, AlN, VN). Tyto nitridy jsou v porovnání s nitridy železa tvrdší a stálejší za vysokých teplot.

Nejčastěji se konstrukční oceli nitridují v plynném prostředí v plynotěsných pecích s nucenou cirkulací atmosféry. Dusík k sycení se získává ze plynného čpavku, ten se při styku s povrchem oceli rozpadá: $2\text{NH}_3 \rightarrow 2\text{N} + 3\text{H}_2$. Část vniklých atomů dusíku je absorbována povrchem oceli, kde v difuzní vrstvě tvoří nitridy, zbytek atomárního dusíku tvoří molekuly neschopné adsorpce.

Pro nitridaci jsou vhodné konstrukční oceli s obsahem uhlíku od 0,3 do 0,4 hm. %. Vhodnými legujícími prvky jsou chrom, hliník, vanad. Před nitridací se součásti zpravidla zušlechťují, po nitridaci je součást pouze broušena. V povrchové vrstvě je vlivem růstu objemu vyvoláno tlakové pnutí, které má společné se zvýšenou plastickou odolností vrstvy pozitivní vliv na mez únavy.

Dalším typem povrchových úprav je nitrocementování a karbonitridování. V obou případech se jedná o sycení povrchu součásti zároveň uhlíkem i dusíkem, rozdílné jsou teploty procesu a obsahy těchto prvků v povrchové vrstvě. Nitrocementace se v porovnání s karbonitridováním provádí za vyšších teplot po kratší dobu a vzniklá vrstva má větší hloubku a nižší tvrdost. [3]

5 OCELI K CEMENTOVÁNÍ

Oceli k cementování mají relativně nízký obsah uhlíku a jsou určeny k cementaci nebo karbonitridaci s následným kalením. V důsledku těchto operací je u těchto ocelí dosaženo tvrdého povrchu a houževnatého jádra s dostatečně vysokou pevností, aby se tenká povrchová vrstva neprolamovala. Oceli k cementování bývají dezoxidovány a dodávají se v tepelně nezpracovaném stavu po válcování za tepla. Je u nich předepsána čistota a velikost austenitického zrna. Obsah křemíku je omezen do 0,40 % a obsah fosforu do 0,034 %. K dosažení vhodné obrobitelnosti se oceli žíhají na měkko. Obrobená součást se následně cementuje, kalí a popouští. Oceli se dle chemického složení rozdělují do šesti následujících skupin: Oceli nelegované ušlechtilé, chrómové, chróm-manganové, chróm-molybdenové, chróm-niklové a chróm-molybden-niklové oceli.

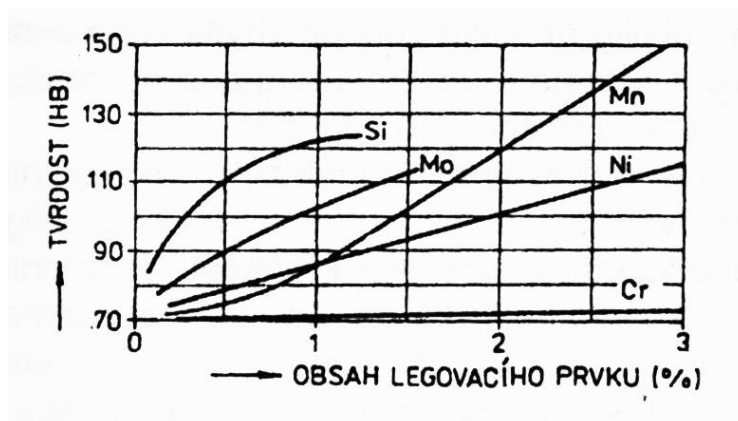
Nelegované oceli mají nízkou prokalitelnost, a proto se používají na málo namáhané součásti. Pro velmi namáhané součásti se používají chrómniklové a chróm-nikl-molybdenové oceli. Chrom-manganové oceli mají také velmi dobré mechanické vlastnosti a často nahrazují oceli chrom-niklové, protože jsou levnější. [3] [4]

Značka	Č. mat.	C [%]	Mn [%]	Cr [%]	Mo [%]	Ni [%]
17Cr3	1.7016	0,14 – 0,20	0,60 – 0,90	0,70 – 1,00		
28Cr4	1.7030	0,24 – 0,31	0,60 – 0,90	0,90 – 1,20		
16MnCr5	1.7131	0,14 – 0,19	1,00 – 1,30	0,80 – 1,10		
20MnCr5	1.7147	0,17 – 0,22	1,10 – 1,40	1,00 – 1,30		
18CrMo4	1.7243	0,15 – 0,21	0,60 – 0,90	0,90 – 1,20	0,15 – 0,25	
20MoCr3	1.7320	0,17 – 0,23	0,60 – 0,90	0,40 – 0,70	0,30 – 0,50	
16NiCr4	1.5714	0,13 – 0,19	0,70 – 1,00	0,60 – 1,70		0,80 – 1,10
10NiCr5-4	1.5805	0,07 – 0,12	0,60 – 0,90	0,90 – 1,20		1,20 – 1,50
15NiCr13	1.5752	0,14 – 0,20	0,40 – 0,70	0,60 – 0,90		3,00 – 3,50
20NiCrMo2-2	1.6523	0,17 – 0,23	0,65 – 0,95	0,35 – 0,70	0,15 – 0,25	0,40 – 0,70
17NiCrMo6-4	1.6566	0,14 – 0,20	0,60 – 0,90	0,80 – 1,10	0,15 – 0,25	1,20 – 1,50
18CrNiMo7-6	1.6587	0,15 – 0,21	0,50 – 0,90	1,50 – 1,80	0,25 – 0,35	1,40 – 1,70
14NiCrMo13-4	1.6657	0,11 – 0,17	0,30 – 0,60	0,80 – 1,10	0,10 – 0,25	3,00 – 3,50

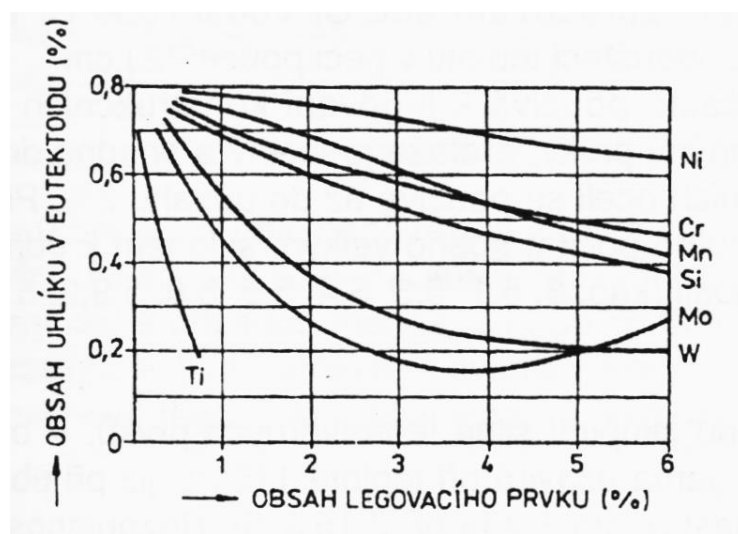
Tab. 5.1: Vybrané oceli vhodné k cementování [3]

5.1 Vliv legujících prvků na vlastnosti oceli

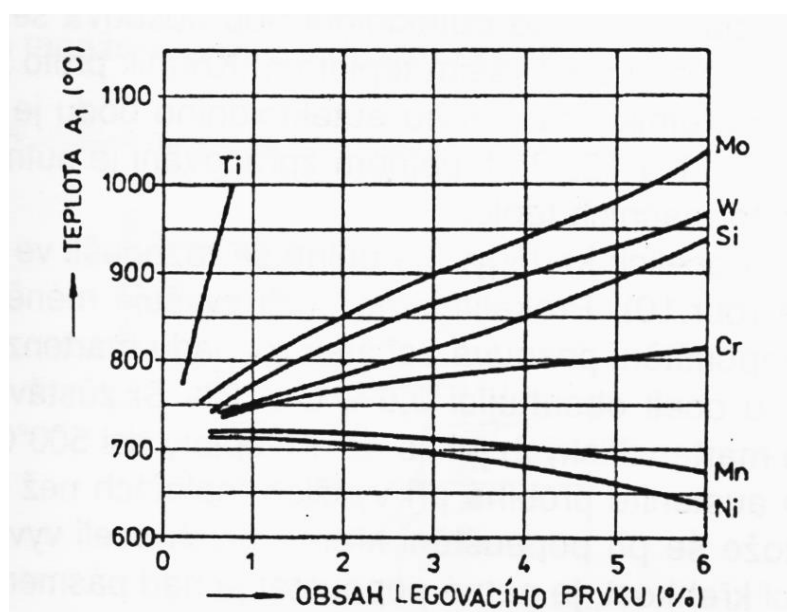
Aby byli zajištěny všechny mechanické, fyzikální a chemické požadavky na oceli, je potřeba tyto oceli legovat. Legujícími prvky lze výrazně ovlivnit zejména mez kluzu, plastické vlastnosti, prokalitelnost a tím i deformace při kalení, mez únavy, mez tečení, odolnost proti korozi a velikost strukturních změn při následném tepelném zpracování. Při legování cementačních ocelí pro výrobu ozubených kol je cílem zejména zvýšení prokalitelnosti. Legované oceli jsou výrazně dražší než oceli nelegované, proto se používají v zušlechtěném stavu. K legování se nejčastěji používá mangan, křemík, nikl, chrom, vanad, molybden. [4]



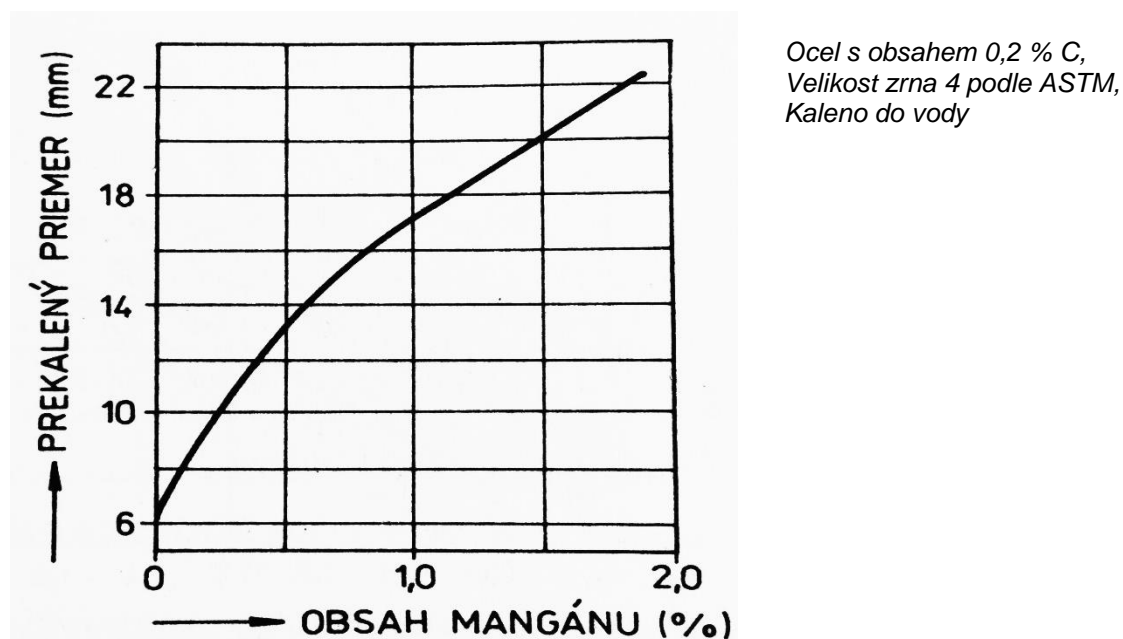
Obr. 5.1: Vliv legovacích prvků na tvrdost feritu [4]



Obr. 5.2: Vliv legovacích prvků na obsah uhlíku v eutektoidech [4]

Obr. 5.3: Vliv legovacích prvků na teplotu A_1 [4]

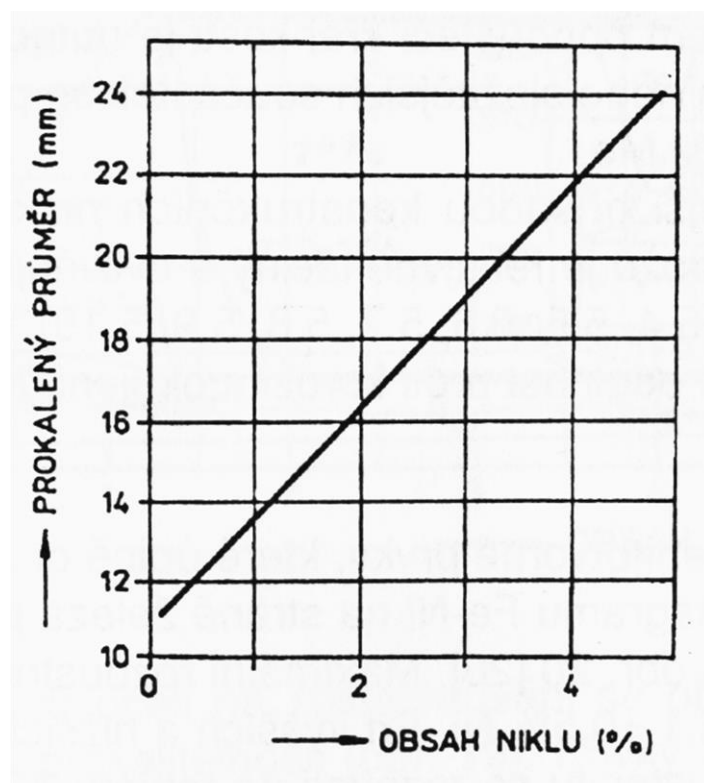
Mangan se rozpouští ve feritu, zvyšuje pevnost, tvrdost a houževnatost oceli, při zachování plastických vlastností. V koncentraci v rozmezí 0.3 až 1% vylučuje mangan sulfidy, které mají nepříznivý vliv na houževnatost oceli a tranzitní teplotu. Pevnost je manganem zvýšena v závislosti na obsahu uhlíku, čím méně uhlíku ocel obsahuje, tím více roste pevnost oceli. U nízkolegovaných ocelí snižuje náchylnost ocelí proti popouštěcí křehkosti. Křivky v ARA a IRA diagramu se posouvají doprava, čímž se zvyšuje prokalitelnost. Zvyšuje dobu potřebnou k fázové transformaci, čímž usnadňuje kalení do olejové lázně. Legování ocelí manganem je velmi časté, protože mangan je levný a snadno dostupný. [3] [4]



Obr. 5.4: Vliv manganu na prokalitelnost oceli [5]

Křemík netvoří karbidy a úplně se rozpouští ve feritu a zvyšuje jeho pevnostní vlastnosti, ale výrazně jen do 1 %. Zvyšuje prokalitelnost, ale méně než chrom a mangan, pevnost a mez kluzu. Způsobuje zvýšení teplot rozpadu martenzitu a zbytkového austenitu při popouštění a snižuje kritickou rychlost ochlazování. Spolu s manganem tvoří oxysulfidy, díky kterým má ocel maximální plastické vlastnosti. Tohoto lze využít pouze u tvářených ocelí, protože v ocelích na odlitky křemík ani mangan nesníží obsah oxidu železnatého natolik, aby se netvořili bubliny a bodliny. Výrazné legování křemíkem se používá u některých svařitelných ocelí s vyšší mezí kluzu, žáruvzdorných a pružinových ocelí. [3] [4]

Nikl zvyšuje prokalitelnost, snížením kritické rychlosti rozpadu austenitu, ale výrazně méně než mangan a chrom, pevnost a u normalizačně žíhaných ocelí zjemňuje perlit. Zvyšuje elektrochemickou odolnost oceli. Nerezisty jsou korozivzdorné slitiny, které obsahují více než 18% niklu. U těchto slitin lze obsahem niklu měnit koeficient tepelné roztažnosti. Nikl je velmi drahý, proto legovat oceli niklem ke zvýšení pevnosti může být neefektivní. Na druhou stranu oceli legované niklem mají největší pevnost jádra a jsou vhodné pro velmi namáhané součásti jako třeba ozubená kola s tenkými zuby. Používá se zejména u ocelí s vysokou houževnatostí při záporných teplotách. [3] [4]

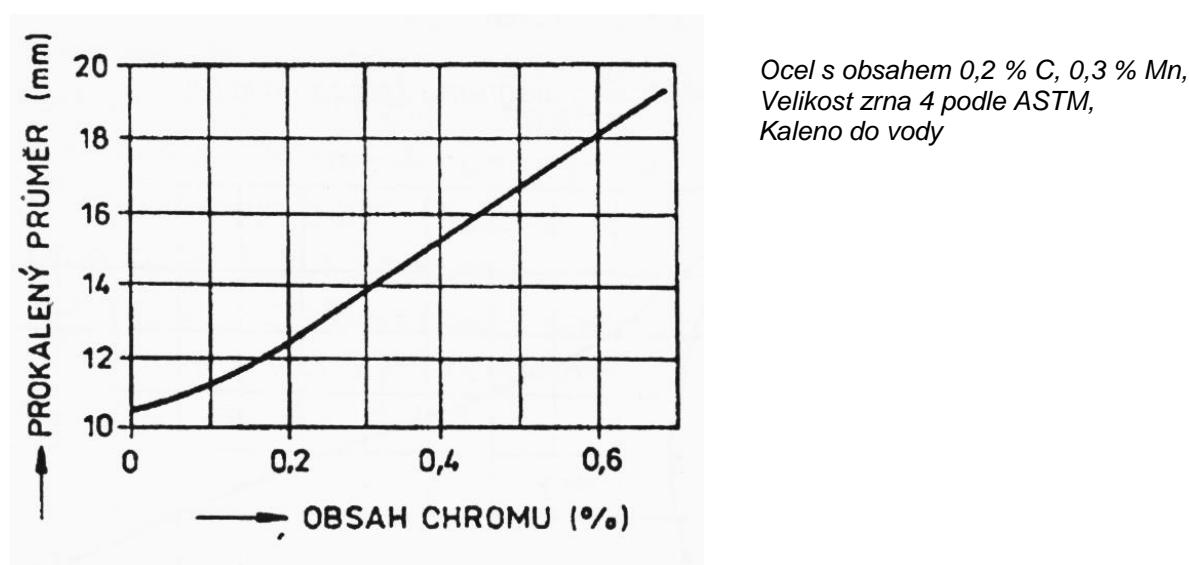


*Ocel s obsahem 0,2 % C, 0,3 % Mn,
velikost zrna 4 podle ASTM,
kaleno do vody*

Obr. 5.5: Vliv niklu na prokalitelnost oceli [4]

Vanad zvyšuje pevnost a tvrdost, při zachování houževnatosti. Používá se ke zmírnění růstu austenitického zrna za vyšších teplot, tím se dosáhne jemnozrnné struktury. Snižuje kritickou rychlost rozpadu austenitu, čímž se zvýší prokalitelnost. Protože se vanad rozpouští částečně ve feritu, má vliv na houževnatost. S uhlíkem tvoří stabilní karbid, jehož tvrdost se pohybuje okolo 2500HV. Vanad bývá obvykle kombinován s jinými legujícími prvky. Vyšší obsah vanadu mají oceli odolné proti vodíkové korozi a žárupevné. Legování vanadem se používá u nástrojových ocelí. [3] [4]

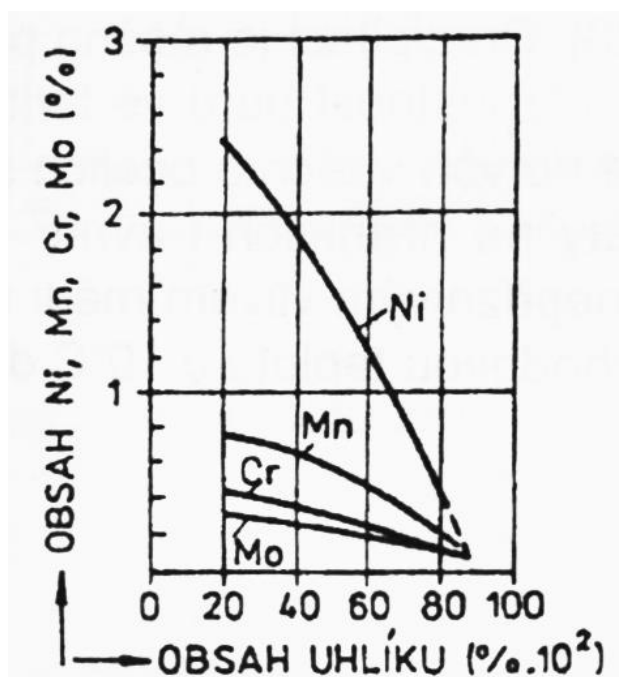
Chrom se používá zejména ke zvýšení odolnosti oceli proti korozi. Korozivzdorné oceli jsou schopny pasivace a obsahují 12 až 27 % chromu. Zvyšuje tvrdost, při zachování houževnatosti oceli a s rostoucím obsahem pomalu roste pevnost. Plastické vlastnosti klesají až do obsahu 2 % chromu pomalu. Typ karbidu, který vzniká v chromových ocelích závisí na obsahu uhlíku a chromu. Nejvyšší tvrdost má karbid $(\text{Fe,Cr})_7\text{C}_3$, který vzniká při vyšším obsahu chromu, asi 2 až 7% a obsahuje 30 až 50% železa. Zvyšuje prokalitelnost, avšak je potřeba počítat s nutností rozpuštění karbidů chromu při austenitizaci. Prokalitelnost totiž zvyšuje pouze chrom rozpuštěný v austenitu, nerozpuštěné karbidy jsou krystalizační zárodky, které prokalitelnost snižují. Je tedy potřeba správně zvolit kalicí teplotu, protože karbidy chromu se rozpouštějí až za vyšších teplot. Chrom je velmi častou přísadou v ocelích, protože je relativně levný a pozitivně ovlivňuje mnoho vlastností. [3] [4]



Obr. 5.6: Vliv chromu na prokalitelnost [4]

Molybden se částečně rozpouští ve feritu, zbytek tvoří karbidy. Posouvá rozpad martenzitu k vyšším popouštěcím teplotám. Tento jev se využívá u zakalených ocelí, kdy je potřeba žíhat ke snížení pnutí při vyšších teplotách. Snížením kritické rychlosti rozpadu austenitu, zvyšuje prokalitelnost. Při vyšších koncentracích může ve struktuře tvořit intermetalické fáze (Fe_2W), které mohou být použity k vytvrzení oceli. Obsah 2,1 až 0,2 % molybdenu snižuje vysokoteplotní popouštěcí křehkost. Molybden je velmi drahý prvek, proto se používá pouze v omezených případech. [3] [4]

Bór je rozpuštěn v matrici, může být také vyloučen jako precipitát na hranicích sekundárních austenitických zrn. Rozpustnost v austenitu dosahuje 0,021 % B, ve feritu je podstatně nižší, pouze asi 0,001 % B. Atomy se ukládají především na hranicích zrn a zpomalují difúzi uhlíku a vylučování proeutektoidního feritu. Je zpomalen začátek austenitické transformace a tím se je zvýšena prokalitelnost. Srovnatelné zvýšení prokalitelnosti jiných prvků jako 0,003 % B je znázorněno na obr. 5.7. Zvyšování prokalitelnosti je ovlivněno obsahem uhlíku, prokalitelnost zvyšuje pouze u měkkých ocelí s nižším obsahem uhlíku. [3] [4]



Obr. 5.7: Obsah prvků ovlivňující prokalitelnost stejně jako 0,003 % B [4]

6 EXPERIMENTÁLNÍ MATERIÁL A METODIKA

V experimentální části se zabývám přípravou a zkoumáním metalografických vzorků z ozubených kol, které dodala společnost TATRA TRUCKS a.s. Dále bylo provedeno měření mikrotvrdosti na okraji zubu a Jominiho zkouška prokalitelnosti na vzorcích ze stejných materiálů. Nakonec byla provedena chemická analýza ozubených kol.

Ocel 14 224



Obr. 6.1: Ozubené kolo z oceli 14 224, přední pohled



Obr. 6.2: Ozubené kolo z oceli 14 224, boční pohled

Chemické složení (rozbor tavby) [%]	C	Mn	Si	P	S	Cr	B
	0,17 0,24	1,10 1,40	0,17 0,37	max. 0,035	max. 0,035	0,80 1,10	0,001 0,005

Tab. 6.1: Chemické složení oceli 14 224 [10]

Ocel je vhodná pro výrobu značně namáhaných cementovaných součástí s vysokou pevností v jádře po kalení (např. ozubená kola, čepy). Pro obrábění se doporučuje ocel žíhaná na měkko, výkovky izotermicky žíhané, nebo normalizačně žíhané a popouštěné.

Tvrdost cementované vrstvy je 62 HRC. [10]

Ocel ZF1A

Obr. 6.3: Ozubené kolo z oceli ZF1A, přední pohled



Obr. 6.4: Ozubené kolo z oceli ZF1A, boční pohled

Chemické složení (rozbor tavby) [%]	C	Si	Mn	P	Cr	Mo	Ni
	0,15	max.	0,5	max.	1,50	0,25	1,40
	0,19	0,40	0,9	0,025	1,80	0,35	1,70
Chemické složení (rozbor tavby) [%]	Cu	Al	Sn	Ti	Ca	Sb	O
	max.	0,02	max.	max.	max.	max.	max.
	0,30	0,05	0,03	0,005	0,003	0,005	0,0025

Tab. 6.2: Chemické složení oceli ZF1A [10]

Ocel je vhodná pro výrobu nejvíce namáhaných převodových součástí, například talířová kola, pastorky větších rozměrů a podobné části. Tvrdost cementované vrstvy je 60-63 HRC. [10]

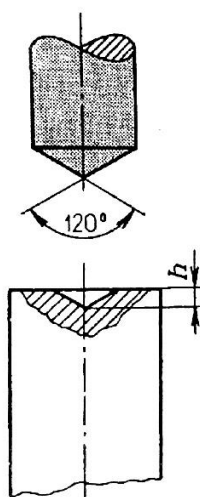
6.1 Jominiho zkouška prokalitelnosti

Jominiho zkouška prokalitelnosti byla provedena v přípravku, který zajišťuje vhodný stálý tlak proudící vody s clonou, která umožňuje rychlé otevření proudu vody.

Zkouška byla provedena podle normy ČSN EN ISO 642. Teploty pro austenitizaci byly voleny dle materiálových listů jednotlivých ocelí, výdrž na austenizační teplotě byla v obou případech 30 minut po ohřevu trvajícím 20 minut.

Měření tvrdosti bylo provedeno metodou podle Rockwella na tvrdoměru od firmy Leco. Výsledné tvrdosti jsou průměrem ze dvou naměřených hodnot na protilehlých vybroušených stranách.

Princip měření tvrdosti metodou podle Rockwella spočívá v zatlačování kuličky nebo diamantového kužele s vrcholovým úhlem 120° definovanou silou. Podle typu zkoušeného materiálu je předepsána zátěžná síla a indenter. V tomto případě bylo použito metody HRC, kde je indentorem jehlan a zatížení 150 kp, používané pro vysokopevné oceli. Výsledná tvrdost je zjištěna rozdílem hloubky h při dvou stupních zatížení (předběžného a celkového). [8]



Obr. 6.5: Tvar indentoru a rozměr vtisku u zkoušky podle Rockwella [8]

6.2 Příprava metalografických vzorků

Ozubená kola byla nejdříve rozřezána v dílnách ústavu technologie. Další řezy byly prováděny na stolní rozbrušovací pile MSX 250 Series od firmy Leco při dostatečném chlazení tak, aby nedošlo k tepelnému ovlivnění struktury. Podélný řez byl veden kolmo na ozubení

Vzniklé vzorky byly zalisovány za tepla do termoplastické pryskyřice MultiFast Green a ClaroFast na zařízení PR-4X od firmy Leco a označeny pro identifikaci.

Následovalo broušení za mokra na metalografické brusce GPX 300 od firmy Leco. Brusné papíry byly voleny od zrnitosti 800 až po 4000.

Leštění probíhalo na stejném přístroji jako broušení při využití leštících diamantových past. Leštící proces byl smáčen ethanolem. Správnost vyleštění byla zkontrolována na mikroskopu. Před naleptáním vzorku byla měřena mikrotvrdost a pro zviditelnění struktury a pro odstranění tzv. Beilbyho vrstvy byly vzorky naleptány leptadlem Nital 2 % (2 % HNO_3 v $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$).

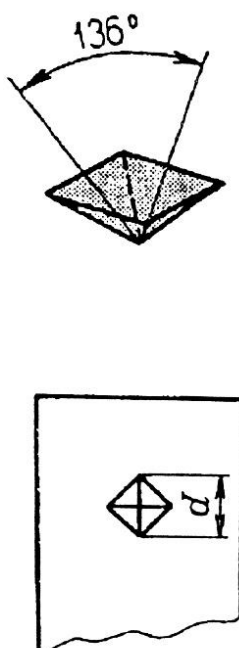


Vlevo: ocel ZF1A
Vpravo: ocel 14 224

Obr. 6.6: Naleptané vzorky

6.3 Měření mikrotvrdosti

Mikrotvrdost byla měřena metodou Vickerse 0,2. Princip měření tvrdosti metodou podle Vickerse spočívá v zatlačení indentoru tvaru jehlanu s čtvercovou základnou s vrcholovým úhlem 136° . Výslednou tvrdost lze určit ze vztahu $HV = 1,854 * F/d^2$ [kp/mm^2], kde F v kp ($1\text{ kp}=9,81\text{ N}$) je zatěžující síla a d je střední velikost uhlopříčky vtisku v mm . [8]



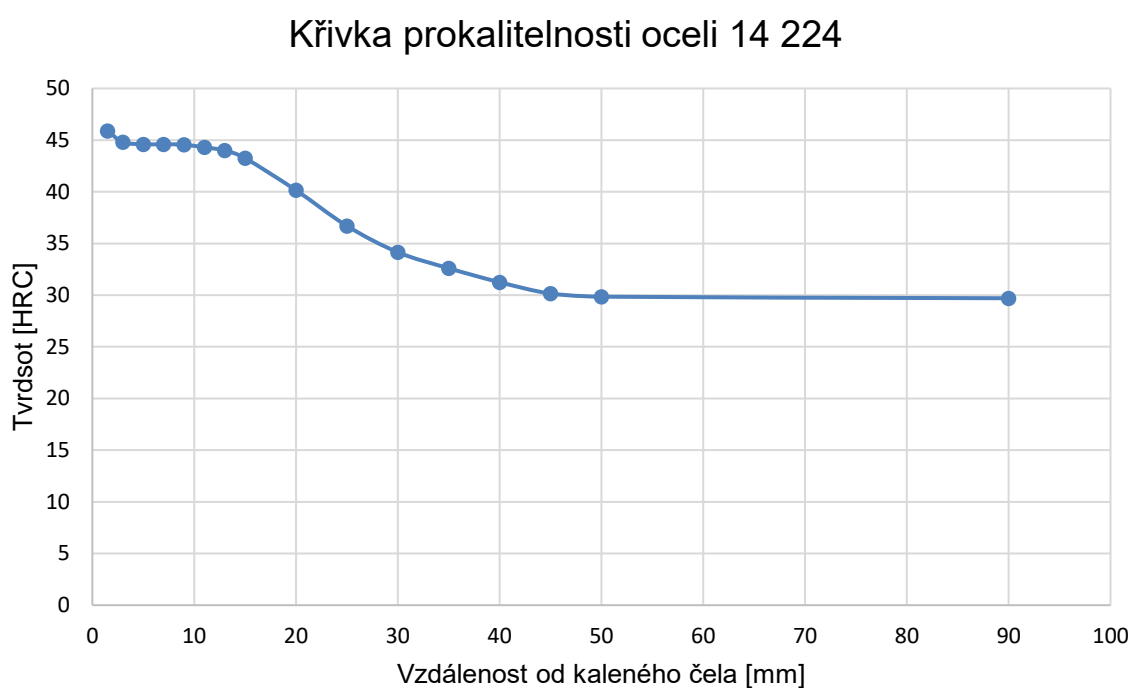
Obr. 6.7: Tvar indentoru a rozměr vtisku u zkoušky podle Vickerse [8]

7 VÝSLEDKY

Chemickou analýzou ozubených kol bylo zjištěno, že chemické složení odpovídá příslušným materiálovým listům. Výsledky chemické analýzy jsou uvedeny v příloze 1.

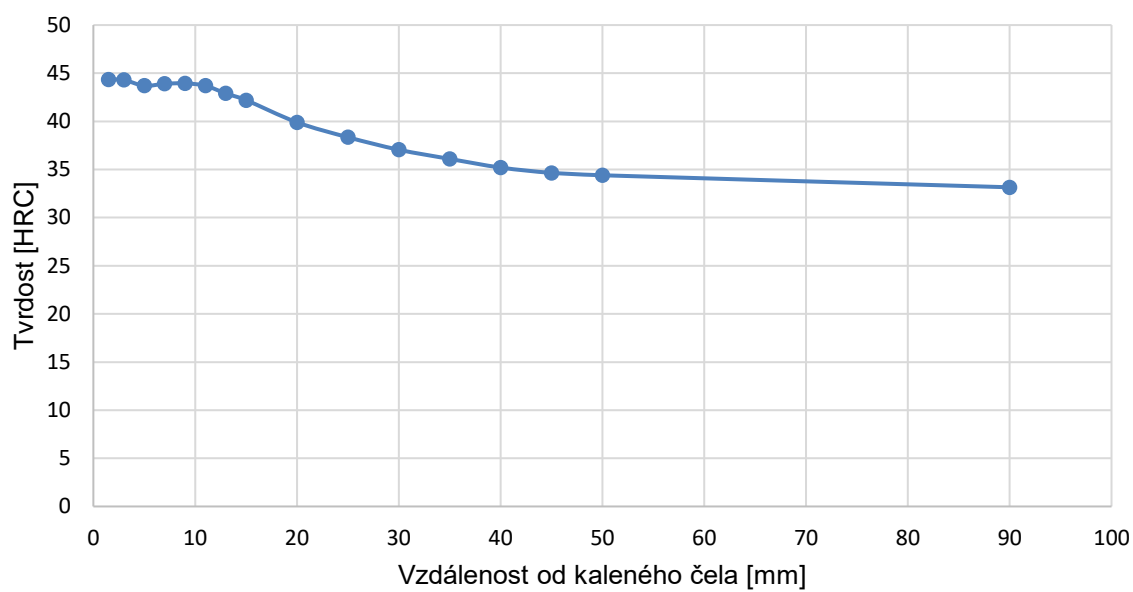
7.1 Prokalitelnost

Pro Jominiho zkoušku byla ocel 14 224 zahřáta v laboratorní peci od firmy LAC na kalicí teplotu 830 °C, výdrž na teplotě byla 30 minut. Ocel ZF1A byla zahřáta na teplotu 860 °C, při výdrži také 30 minut. Následně se postupovalo podle normy pro Jominiho zkoušku prokalitelnosti.



Obr. 7.1: Křivka prokalitelnosti oceli 14 224

Křivka prokalitelnosti oceli ZF1A



Obr. 7.2: Křivka prokalitelnosti oceli ZF1A

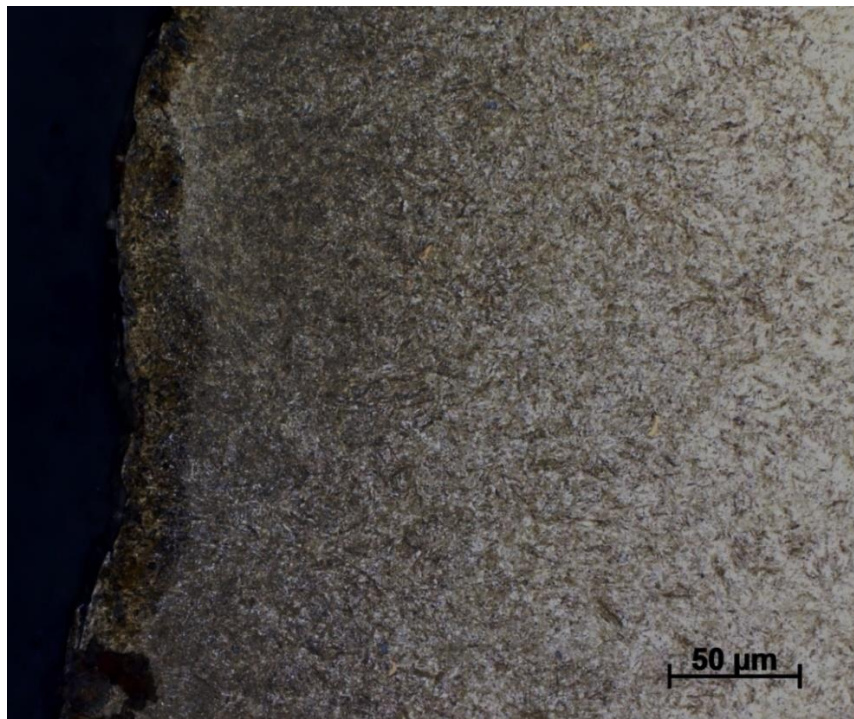


Obr. 7.3: Vzorky pro Jominiho zkoušku po měření tvrdosti

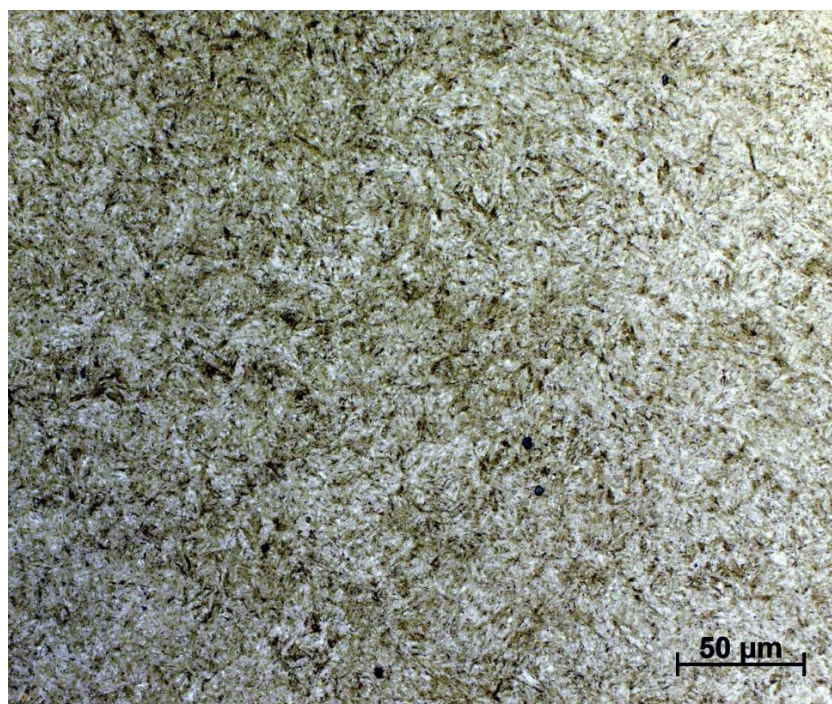
7.2 Mikrostruktury

Po naleptání vzorků odebraných z obou kol byly pozorovány jednotlivé mikrostruktury. Focení probíhalo na světelném mikroskopu Olympus GX 51 s digitální kamerou Nikon DS-Fi1.

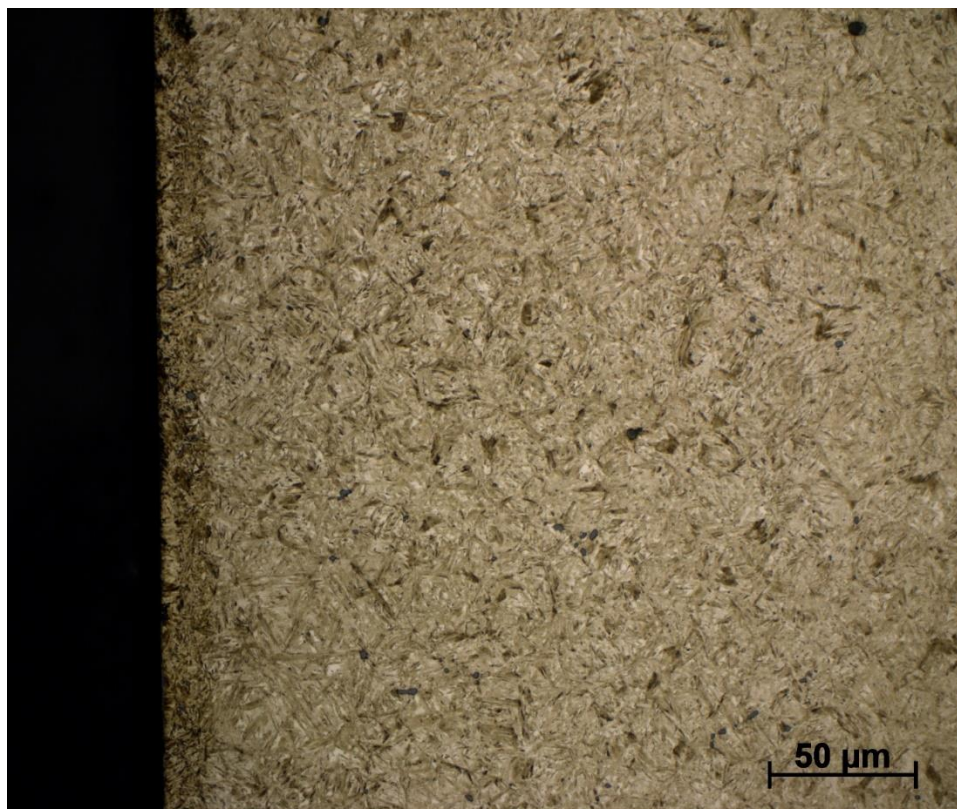
Ocel 14 224



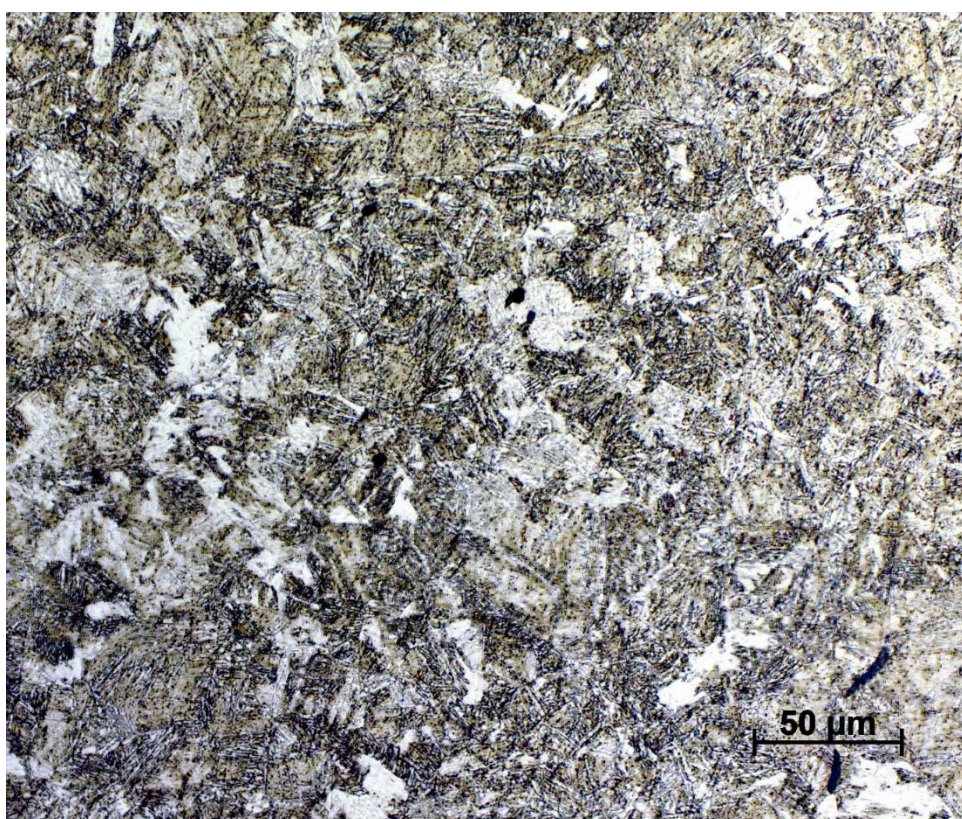
Obr. 7.4: Světelná mikroskopie, Z=500x, okraj zubu, ocel 14 224



Obr. 7.5: Světelná mikroskopie, Z=500x, základní materiál zubu, ocel 14 224

Ocel ZF1A

Obr. 7.6: Světelná mikroskopie, Z=500x, okraj zubu, ocel ZF1A



Obr. 7.7: Světelná mikroskopie, Z=500x, základní materiál zubu, ocel ZF1A

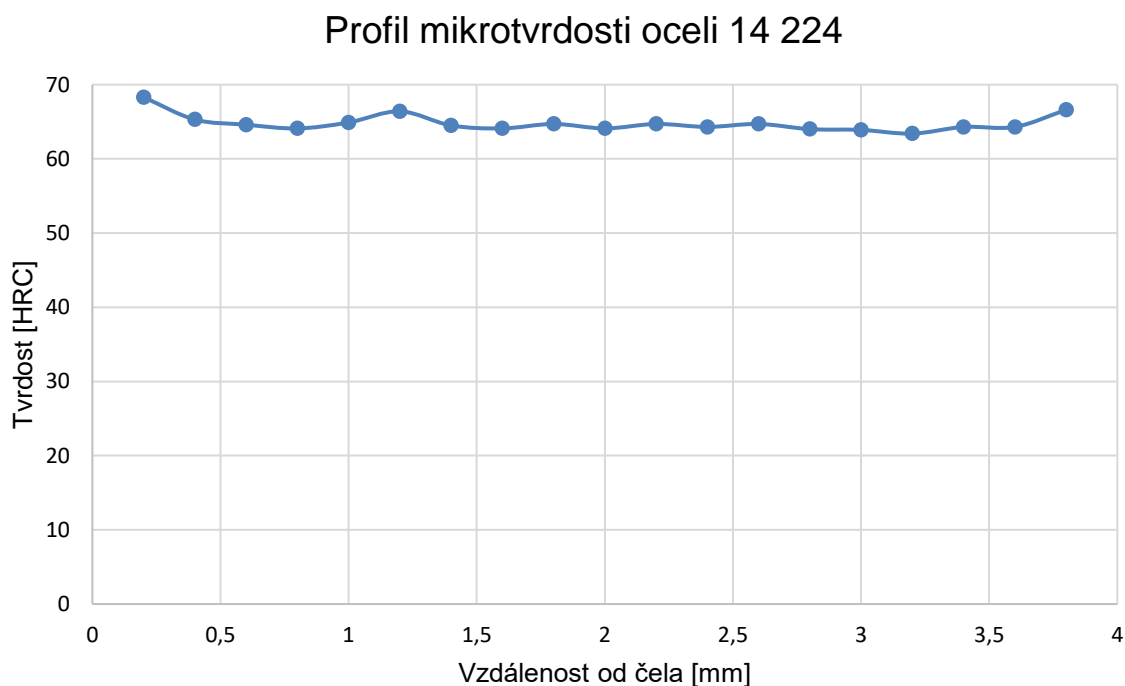
7.3 Profil mikrotvrdosti

Mikrotvrdost byla měřena na mikrotvrdoměru LECO LM 247 AT metodou Vickerse 0,2. Naměřené hodnoty byly automaticky přepočítány na hodnoty HRC, které jsou dále prezentovány.

Ocel 14 224

Vzdálenost od čela [mm]	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2
Tvrdost [HV 0,2]	961	841	818	802	828	878	815	802	821	802
Tvrdost [HRC]	68,3	65,3	64,6	64,1	64,9	66,4	64,5	64,1	64,7	64,1
Vzdálenost od čela [mm]	2,2	2,4	2,6	2,8	3	3,2	3,4	3,6	3,8	
Tvrdost [HV 0,2]	821	811	821	799	796	784	811	808	885	
Tvrdost [HRC]	64,7	64,3	64,7	64	63,9	63,4	64,3	64,3	66,6	

Tab. 7.1: Profil mikrotvrdosti zubu z oceli 14 224



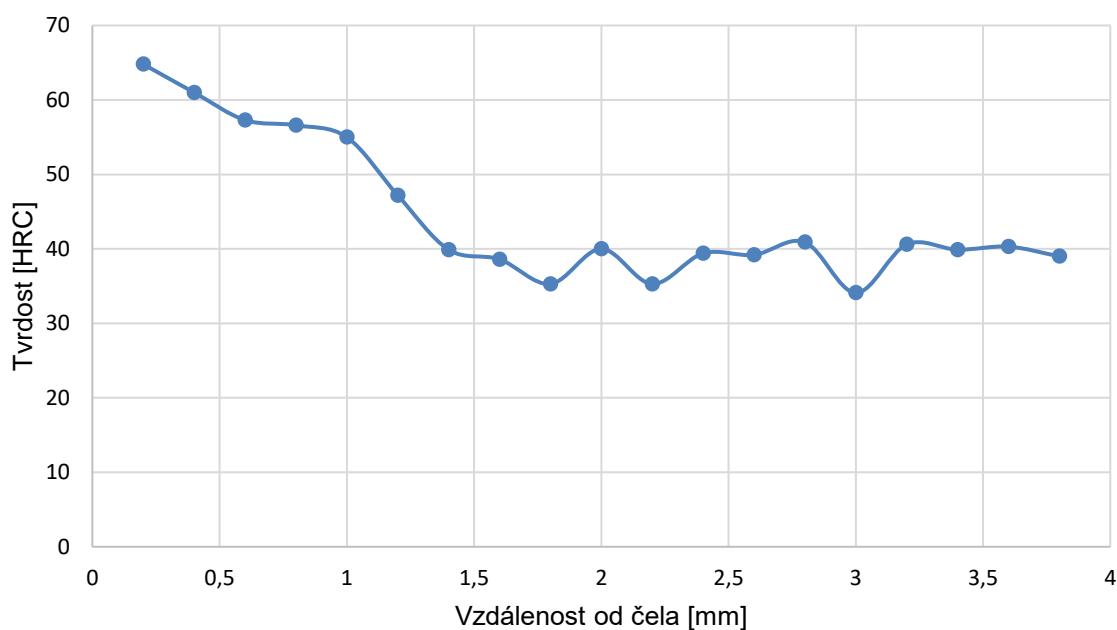
Obr. 7.8: Profil mikrotvrdosti zubu z oceli 14 224

Ocel ZF1A

Vzdálenost od čela [mm]	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2
Tvrдост [HV 0,2]	825	713	639	626	595	474	391	378	348	39,2
Tvrдост [HRC]	64,8	61	57,3	56,6	55	47,2	39,9	38,6	35,3	40
Vzdálenost od čela [mm]	2,2	2,4	2,6	2,8	3	3,2	3,4	3,6	3,8	
Tvrдост [HV 0,2]	384	386	384	401	337	398	391	395	382	
Tvrдост [HRC]	35,3	39,4	39,2	40,9	34,1	40,6	39,9	40,3	39	

Tab. 7.2: Profil mikrotvrđosti zubu z oceli ZF1A

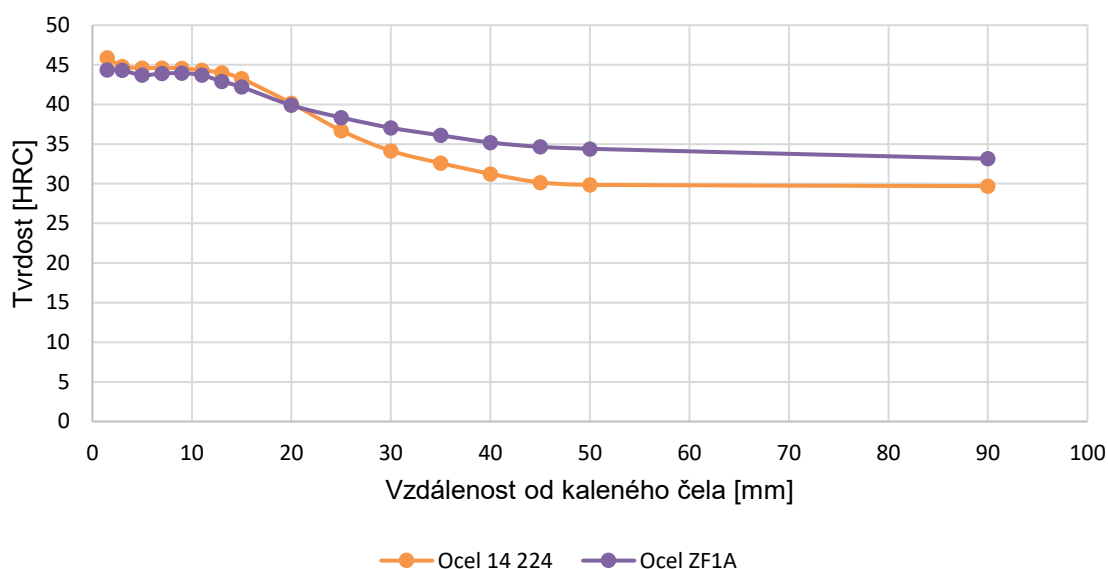
Profil mikrotvrđosti oceli ZF1A



Obr. 7.9: Profil mikrotvrđosti zubu z oceli ZF1A

8 DISKUZE

Srovnání křivek prokalitelnosti

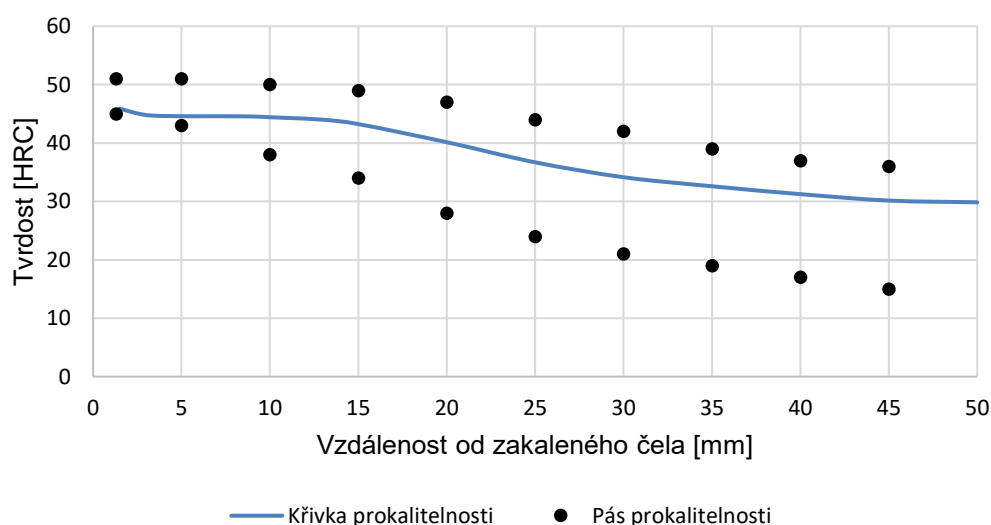


Obr. 8.1: Srovnání křivek prokalitelnosti

Ze křivek prokalitelnosti lze konstatovat, že obě oceli po zakalení dosahují srovnatelných tvrdostí (okolo 45 HRC). Ocel ZF1A dosahuje mírně vyšší tvrdosti v nezakaleném stavu, asi 35 HRC, ocel 14 224 dosahuje asi 30 HRC. Obě oceli obsahují legující prvky, které zvyšují prokalitelnost, z tohoto důvodu jsou dobře prokalitelné do 20 mm.

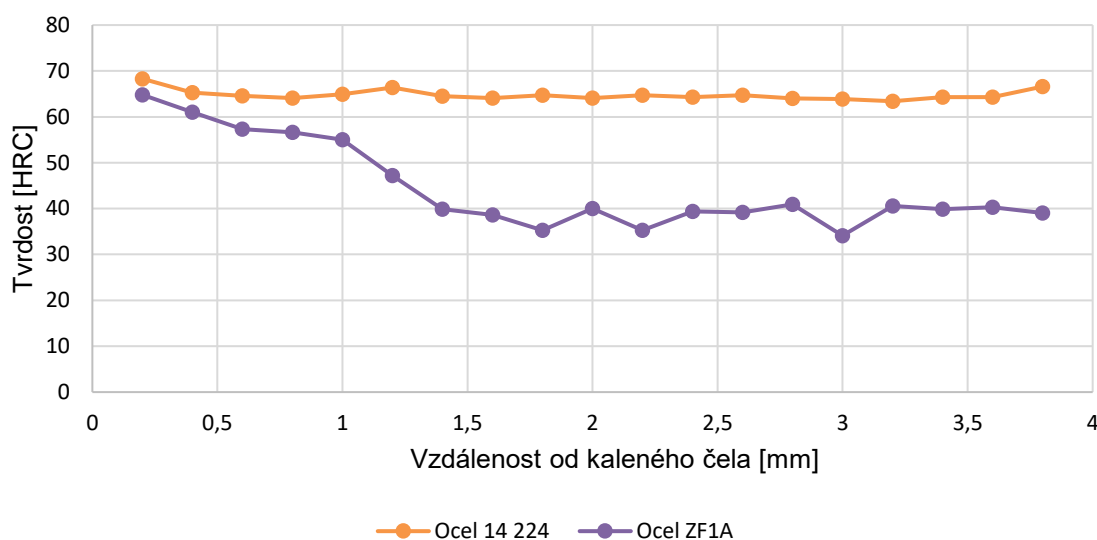
V materiálovém listě oceli 14 224 se nachází pás prokalitelnosti. Při porovnání s naměřenými hodnotami je patrné, že křivka prokalitelnosti leží uvnitř pásu prokalitelnosti. Pro ocel ZF1A se v materiálovém listě pás prokalitelnosti nenachází.

Křivka a pás prokalitelnosti oceli 14 224



Obr. 8.2: Křivka a pás prokalitelnosti oceli 14 224 [10]

Srovnání profilů mikrotvrdosti



Obr. 8.3: Srovnání profilů mikrotvrdosti

Materiálový list udává tvrdost cementační vrstvy oceli ZF1A 60-63 HRC. Z profilu mikrotvrdosti a ze snímků pořízených na mikroskopu lze konstatovat tloušťku cementační vrstvy asi 1 mm s tvrdostí okolo 60 HRC. Blízkost povrchu zubu je tvořena jemnozrnnou martenzitickou strukturou, typickou pro zušlechtěné oceli. Struktura směrem k jádru postupně hrubne a jádro tvoří martenziticko-bainitická struktura s tvrdostí mezi 35 až 40 HRC.

Materiálový list oceli 14 224 udává tvrdost cementační vrstvy 62 HRC, což lze považovat za srovnatelné s ocelí ZF1A. Tvrdost cementační vrstvy byla naměřena vyšší, okolo 65 HRC. Strukturu povrchu zubu tvoří jemný martenzit a velké množství karbidů. Tvrdost směrem k jádru ale neklesá, jak by se dalo předpokládat, tvrdost jádra se pohybuje okolo 63 HRC. V jádře je struktura tvořena stále jemným martenzitem s menším množstvím karbidů, což svědčí o velmi dobré prokalitelnosti oceli. U ozubených kol je cílem získat tvrdou povrchovou vrstvu a houževnatý základní materiál zubu. Takto vysoká tvrdost by mohla způsobit křehkost zubu, která může mít při velkém rázu za následek křehký lom. Proto by bylo vhodné podrobit ozubené kolo běhové či pulsátorové zkoušce. [9]

9 ZÁVĚR

Bakalářská práce se zabývá tepelným zpracováním ocelí pro výrobu ozubených kol. Mezi používaná tepelná zpracování cementačních ocelí patří žíhání, kalení a popouštění. Ozubená kola bývají často také chemicko-tepelně upravena, a to cementováním nebo nitridováním. Po cementaci následují další tepelná zpracování, po nitridaci jsou kola pouze broušena.

V experimentální části byly ze dvou ozubených kol, které dodalo společnost TATRA TRUCKS a.s. vyrobeny metalografické vzorky zubů a pozorována jejich mikrostruktura na okraji zubu a v základním materiálu zubu. Na okraji zubu bylo provedeno měření mikrotvrdosti s cílem posouzení cementační vrstvy.

Z těchto pozorování a měření bylo zjištěno, že ozubené kolo z oceli ZF1A má asi 1 mm tlustou cementační vrstvu s tvrdostí okolo 60 HRC. Struktura u okraje zubu je tvořena jemnozrnnou martenzitickou strukturou, základní materiál zubu tvoří hrubší martenziticko-bainitická struktura s tvrdostí 35 až 40 HRC.

Ozubené kolo z oceli 14 224 dosahuje u povrchu zubu tvrdosti okolo 65 HRC a směrem k jádru zubu tvrdost výrazně neklesá, na rozdíl od ozubeného kola z oceli ZF1A. Struktura je v celém objemu tvořena jemným martenzitem společně s karbidy, kterých směrem k jádru zubu ubývá.

Na vzorcích ze stejných materiálů jako ozubená kola byla provedena Jominiho zkouška prokalitelnosti a bylo ujištěno, že obě oceli jsou prokalitelné do asi 20 mm.

Na závěr byla provedena chemická analýza vzorků z ozubených kol, která potvrdila, že chemické složení ozubených kol odpovídá příslušným materiálovým listům.

10 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ŽÁČEK, Jaroslav. Učíme se v prostoru. [online] [cit. 2017-05-13]. Dostupné z WWW: http://uwp3d.cz/drtic/?page_id=2888
- [2] SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE, Richard G. (Richard Gordon) BUDYNAS, Martin HARTL a Miloš VLK. Konstruování strojních součástí. V Brně: VUTIUM, 2010, xxv, 1159 s.: il.; 26 cm. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [3] PTÁČEK, Luděk. Nauka o materiálu II. 2., opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s.: il.; 25 cm. ISBN 80-7204-248-3.
- [4] FREMUNT, Přemysl a Tomáš PODRÁBSKÝ. Konstrukční oceli. Brno: CERM, 1996, 261 s.: obr., tabulky, grafy. ISBN 80-85867-95-8.
- [5] KUZIČKIN, Dimitrij, Přemysl FREMUNT a Bohumil MÍŠEK. Konstruktivní oceli tvárněné a na odliatky. Bratislava: Praha: Alfa; SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1988, 301 s.: obr., tabulky, grafy.
- [6] Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, Ústav konstruování. Přednáška 2 [online]. 2017 [cit. 2017-05-13]. KONSTRUOVÁNÍ STROJŮ-strojní součásti. Dostupné z WWW: https://moodle.vutbr.cz/pluginfile.php/287009/mod_resource/content/1/prednaska2_6KT_nahled.pdf
- [7] Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, Ústav konstruování. Přednáška 1 [online]. 2017 [cit. 2017-05-13]. KONSTRUOVÁNÍ STROJŮ-strojní součásti. Dostupné z WWW: https://moodle.vutbr.cz/pluginfile.php/287004/mod_resource/content/1/prednaska1_6KT_nahled.pdf
- [8] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu. I.* 2. opr. a rozš. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003, xii, 516 s.: il. ISBN 80-7204-283-1.
- [9] Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, Ústav konstruování. Přednáška 5 [online]. 2017 [cit. 2017-05-13]. KONSTRUOVÁNÍ STROJŮ-strojní součásti. Dostupné z WWW: https://moodle.vutbr.cz/pluginfile.php/287015/mod_resource/content/1/prednaska5_6KT_nahled.pdf
- [10] Osobní komunikace s vedením společnosti TATRA TRUCKS a.s.

11 SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

Obr. 1.1: Princip tepelného zpracování	8
Obr. 3.1: Oblasti žíhacích teplot v diagramu Fe-Fe ₃ C	10
Obr. 3.2: Kombinované žíhání.....	11
Obr. 3.3: Průběh ochlazování při kalení v diagramu ARA	12
Obr. 3.4: Pásmo kalicích teplot v diagramu FeFe ₃ C	13
Obr. 3.5: Ochlazovací křivky ve středu ocelového válce \varnothing 10 mm	14
Obr. 3.6: Průběh kalení do studené lázně a lomeného kalení.....	15
Obr. 3.7: Průběh termálního kalení a izotermického zušlechťování	16
Obr. 4.1: Hloubka cementační vrstvy v závislosti na době cementace.....	18
Obr. 4.2: Způsoby kalení po cementování	19
Obr. 5.1: Vliv legovacích prvků na tvrdost feritu	22
Obr. 5.2: Vliv legovacích prvků na obsah uhlíku v eutektoidích	22
Obr. 5.3: Vliv legovacích prvků na teplotu A ₁	22

Obr. 5.4: Vliv manganu na prokalitelnost oceli	23
Obr. 5.5: Vliv niklu na prokalitelnost oceli.....	24
Obr. 5.6: Vliv chromu na prokalitelnost	25
Obr. 5.7: Obsah prvků ovlivňující prokalitelnost stejně jako 0,003 % B.....	26
Obr. 6.1: Ozubené kolo z oceli 14 224, přední pohled	27
Obr. 6.2: Ozubené kolo z oceli 14 224, boční pohled.....	28
Obr. 6.3: Ozubené kolo z oceli ZF1A, přední pohled	29
Obr. 6.4: Ozubené kolo z oceli ZF1A, boční pohled.....	29
Obr. 6.5: Tvar indentoru a rozměr vtisku u zkoušky podle Rockwella	30
Obr. 6.6: Naleptané vzorky	31
Obr. 6.7: Tvar indentoru a rozměr vtisku u zkoušky podle Vickerse.....	31
Obr. 7.1: Křivka prokalitelnosti oceli 14 224	32
Obr. 7.2: Křivka prokalitelnosti oceli ZF1A	33
Obr. 7.3: Vzorky pro Jominiho zkoušku po měření tvrdosti	33
Obr. 7.4: Světelná mikroskopie, Z=500x, okraj zubu, ocel 14 224	34
Obr. 7.5: Světelná mikroskopie, Z=500x, základní materiál zubu, ocel 14 224	34
Obr. 7.6: Světelná mikroskopie, Z=500x, okraj zubu, ocel ZF1A	35
Obr. 7.7: Světelná mikroskopie, Z=500x, základní materiál zubu, ocel ZF1A	35
Obr. 7.8: Profil mikrotvrdosti zubu z oceli 14 224	36
Obr. 7.9: Profil mikrotvrdosti zubu z oceli ZF1A	37
Obr. 8.1: Srovnání křivek prokalitelnosti.....	38
Obr. 8.2: Křivka a pás prokalitelnosti oceli 14 224	38
Obr. 8.3: Srovnání profilů mikrotvrdosti	39
Tab. 3.1: Doporučená tloušťka zakalené vrstvy u ozubených kol	16
Tab. 5.1: Vybrané oceli vhodné k cementování	21
Tab. 6.1: Chemické složení oceli 14 224	28
Tab. 6.2: Chemické složení oceli ZF1A.....	29
Tab. 7.1: Profil mikrotvrdosti zubu z oceli 14 224.....	36
Tab. 7.2: Profil mikrotvrdosti zubu z oceli ZF1A.....	37

12 PŘÍLOHY

Příloha 1: Protokoly o chemickém složení ozubených kol